

Ještě před několika lety zkratka Hi-fi téměř nikomu nic neříkala. Jen ti zasvěcení věděli, že to je zkratka vytvořená z anglického „high fidelity“, což znamená doslova „vysoká věrnost“, a že jde o označení věrné reprodukce zvuku ze záznamu (buď z gramofonových desek, nebo z magnetofonového pásku). Během posledních několika let se pojem Hi-Fi stal téměř běžným, stal se dokonce až módou. Díky velmi aktivní činnosti Československého Hi-Fi klubu zná již mnoho zájemců o věrnou reprodukci správný obsah zkratky Hi-Fi, je však stále dost těch, pro něž je

si lze tedy ověřit, je-li dané zařízení nebo daná nahrávka opravdu „Hi-Fi“. Získáte jasno, jaký skutečný výkon má váš zesilovač a proč vám pro věrnou reprodukci nestačí výkon třeba 2 W, i když rozhlasový přijímač s tímto výkonem málem „zboří byt“. Naučíte se také nepřehánět své požadavky na kvalitu jednotlivých článků reprodukčního řetězce a přizpůsobit vzájemně kvalitu např. gramofonu, zesilovače a reproduktorových soupřav. A až uslyšíte někdy někoho „mávat“ pojmem Hi-Fi, budete schopni posoudit, zda tento termín užívá oprávněně či nikoli.

❀ HI FI ❀

Hi-Fi pouze termín bez obsahu – používají ho a neví, co se za ním všechno skrývá. Jeden příklad za všechny: četl jsem nedávno v bezplatných „Hudebních novinkách“ inzerát: Nejnovější zahraniční slágrý, šansony, pop-music i jazz nahrají komukoli na požádání mono, stereo, popř. hi-fi. Četli jsme tento inzerát ještě s několika přáteli o přestávce v Divadle hudby a s chutí jsme se zasmáli. Inzerující si jistě myslel, že na kouzelnou zkratku Hi-Fi nachytá mnoho zájemců.

Aby bylo na tomto poli ještě jasněji, k tomu má posloužit toto číslo Radiového konstruktéra. V jeho první části jsou vysvětleny všechny pojmy z oboru věrné reprodukce, jako je výkon, zkreslení, šum, odstup, korekce atd. Vysvětluje se také, jak se jednotlivé vlastnosti a parametry zařízení pro věrnou reprodukci měří a jak

V další části je uveden návod ke stavbě jakostního stereofonního zesilovače nejvyšší třídy s výkonem $2 \times 50 \text{ W}$, který splňuje a překročuje nároky na věrnou reprodukci zvuku. Je osazen výhradně křemíkovými tranzistory a je to v současné době asi vrchol toho, co lze ze součástek tuzemské výroby postavit. Stavba tohoto zesilovače je ovšem finančně velmi náročná, a proto mnohým zájemcům poslouží třeba jenom jeho jednotlivé díly – vlastní koncový zesilovač, korekční zesilovač a předzesilovač s malým šumem, napájecí část. Pro ty, kteří se rozhodnou ke stavbě tohoto zesilovače, jsou uveřejněny i obrázky plošných spojů (které si lze jako obvykle objednat u radioklubu Smaragd).

Konečně v třetí části jsou různá zajímavá zapojení jakostních nízkofrekvenčních předzesilovačů a zesilovačů, vybraná

ze zahraniční literatury. Mají dát čtenáři přehled, co je v současné době ve světě moderní, na jakém stupni vývoje je toto odvětví elektroniky. Mnohým jistě poslouží jako námět či inspirace pro vlastní konstrukční práci.

Co v dnešní uspěchané době znamená

pro člověka chvilka klidného posezení s dobře reprodukovanou dobrou hudbou, bylo již mnohokrát napsáno a nebudu se proto opakovat. Jen myslím, že toto číslo Radiového konstruktéra je dalším krokem k tomu, aby si tuto „chvilku“ mohl dopřát širší okruh zájemců.

Nf zesilovače

Adrien Hofhans a ing. Jiří Zíma

Pod pojmem „nizkofrekvenční zesilovač“ rozumíme takové elektronické zařízení, které dovoluje zesílit a popřípadě upravit nf signál z nějakého zdroje tak, aby jím bylo možno napájet reproduktor nebo reproduktorovou soustavu. Nejpožívanějšími zdroji bývají obvykle gramofon, magnetofon, řídicí rozhlasový přijímač (tuner) nebo mikrofón. Na výstup nf zesilovače pak obvykle připojujeme vhodně dimenzovanou soustavu reproduktorů.

Základní elektrické vlastnosti zesilovačů

Výstupní výkon nf zesilovače

Maximální výstupní výkon zesilovače je jednou ze základních veličin, které je nutno při volbě vhodného nf zesilovače uvažovat. V otázce maximální velikosti výstupního výkonu vládne velmi mnoho subjektivních názorů. Ačkoli existují vzorce a tabulky k výpočtu vhodného výkonu v závislosti na objemu ozvučovaného prostoru, přesto jsou výsledky výpočtů při použití různých vztahů a tabulek

obvykle natolik nepřesné, že 100% odchylka je zcela běžná. Je to proto, že zelektroakustického hlediska bychom museli pro dosažení přesnějších výsledků uvažovat řadu nesnadno měřitelných veličin, jako např. akustický útlum prostoru, účinnost reproduktorových soustav, jejich směrovost atd. To vše komplikuje v praxi celou záležitost natolik, že při volbě maximálního potřebného výkonu vycházíme obvykle spíše ze zkušeností než z výpočtů.

V minulých dobách se pro domácí provoz volil výstupní výkon zesilovačů velmi úsporně. Běžné koncové stupně byly schopny odevzdat reproduktorům výkon maximálně 3 až 5 W a zesilovač s výstupním výkonem větším než 10 W byl již považován za extrémně výkonný. Je pochopitelné, že jedním z hlavních důvodů byl nedostatek vhodných stavebních prvků, v tomto případě výkonových elektronek. A navíc zesilovače s výstupním výkonem větším než 10 W představovaly již velmi objemnou stavební jednotku (vzhledem k mohutnému síťovému a výstupnímu transformátoru). Teprve zavedením polovodičů se situace rázem změnila natolik, že dnes má stejně výkonný zesilovač zcela zanedbatelný rozměr i váhu (vzhledem k dřívějším elektronkovým zařízením).

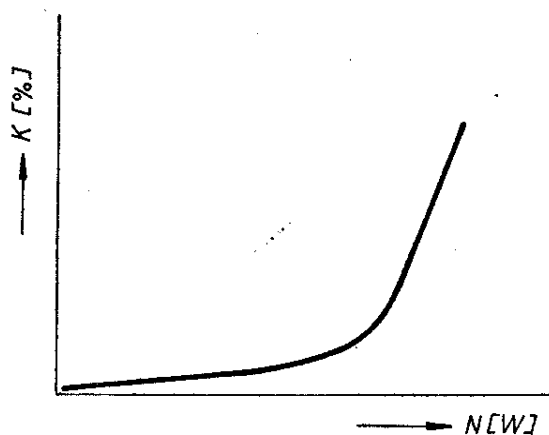
$$2 \cdot \frac{4}{70} R_K$$

V současné době tedy není velikost maximálního výstupního výkonu u zesilovače žádným problémem – stalo se běžnou praxí navrhovat a používat zesilovače o výkonu 10 W až 50 W. Podobné zesilovače jsou schopny napájet jakékoli reproduktorové soustavy v běžných poslechových podmínkách s naprosto postačitelnou rezervou výkonu i při největší hlasitosti. Tedy: nejvhodnější maximální výstupní výkon je v mezích 10 až 30 W.

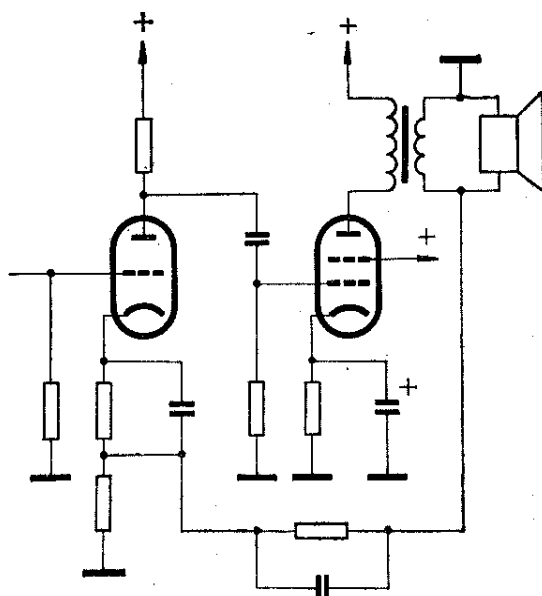
Zkreslení zesilovače

Další podmínkou jakostního přenosu elektroakustického signálu je jeho minimální zkreslení při dostatečném zesílení. Znamená to, že tvarový průběh výstupního signálu musí odpovídat tvarovému průběhu vstupního signálu; řečeno technicky: podíl vyšších harmonických kmitočtů, které způsobují nežádoucí tvarovou deformaci nesmí být větší, než stanovená přípustná mez. Pro zesilovače střední jakosti se volí tato mez asi 3 %, pro zesilovače nejvyšší jakosti pak nejvýše 1 %. Toto maximální dovolené zkreslení nesmí být překročeno ani při maximálním výstupním výkonu zesilovače.

Mezi zkreslením signálu a výstupním výkonem zesilovače je přímá závislost (obr. 1). Jak jsme se již zmínili na str. 2, používaly se dříve zesilovače s velmi omezeným výstupním výkonem. Aby procento zkreslení u těchto zesilovačů nepřekro-



Obr. 1. Závislost zkreslení K na výstupním výkonu N



Obr. 2. Příklad zapojení elektronkového koncového stupně se zpětnou vazbou

čilo dovolenou mez, zaváděly se mezi jednotlivými stupni záporné zpětné vazby, popř. kombinované (pro zmenšení výstupní impedance zesilovače) někdy dokonce s kladnou zpětnou vazbou. Ačkoli všechny tyto úpravy zmenšovaly citlivost zesilovače a musely být přidávány další napěťově zesilující stupně, měly tehdejší zesilovače často velmi dobré vlastnosti a tedy i malé zkreslení při plném – tehdy využívaném – výstupním výkonu. Zpěťnovazební obvody však přinášely do zapojení značnou nestabilitu, neboť vazební smyčky byly často zapojovány přes několik zesilovacích stupňů i přes výstupní transformátor, což způsobovalo natáčení fáze signálu na okrajích přenášeného pásma. Tyto nedostatky bylo nutno kompenzovat zařazováním dalších členů do vazebních smyček a výsledné zapojení pak bylo relativně složité a časově nebo dokonce i teplotně nepříliš stabilní (obr. 2).

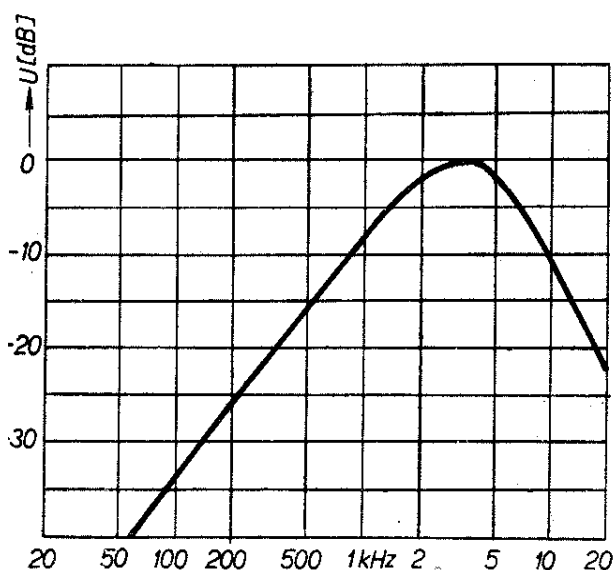
Americké firmy řešily již tehdy tyto otázky s typickou velkorysostí. Zesilovače, které se po poslední válce objevovaly na evropských trzích, měly výstupní výkony 20 až 40 W. Protože byl pro tehdy běžné reproduktorové soustavy a pro maximálně použitelnou hlasitost reprodukce v bytě vhodný výkon nejvýše 10 W, zbyvala velká výkonová rezerva. Výsledné zkreslení při zlomku využívaného výkonu

bylo skutečně zanedbatelné (zvětšovalo se s výkonem). Pozoruhodné je, že tento způsob se dnes běžně používá i v zesilovačích evropských výrobců. Dnešní zesilovače osazené polovodiči jsou opatřeny koncovými stupni, u nichž 20 W výstupního výkonu lze považovat za průměr (v kategorii Hi-Fi zařízení). Tedy: zkreslení výstupního signálu při maximálním výstupním výkonu by (u jakostních zařízení) nemělo překročit 1 %.

Odstup a dynamika zesilovače

U zesilovače (vybuzeného na plný výkon a při modulační „přestávce“) se nesmí v reprodukci objevit pozorovatelný rušivý hluk, dunění, brum nebo šumění. Souhrn těchto jevů nazýváme rušivým zbytkovým signálem a podle druhu a účelu zařízení připouštíme jeho maximální velikost vzhledem k velikosti užitečného signálu. Velikost zbytkového signálu vyjadřujeme v decibelech ve vztahu k napětí při maximálním výkonu a nazýváme „odstup“. Pro běžně používané vstupní obvody (pro gramofon a magnetofon) bývá odstup asi — 60 dB u zesilovačů střední jakosti, u špičkových přístrojů pak — 70 až — 80 dB.

Dynamika zesilovače je v podstatě táž veličina pouze s tím rozdílem, že se měří přes tzv. psfometrický filtr, který respek-



Obr. 3.

tuje křivku slyšitelnosti lidského ucha při malých hlasitostech (obr. 3) (bližší v kapitole o fyziologické regulaci hlasitosti). Aby nedošlo k záměně v udávaných veličinách, udává se dynamika jako poměr užitečného signálu k signálu zbytkovému – proto je výsledek vždy větší než 1 a u decibelového údaje je kladné znaménko.

Kmitočtová charakteristika zesilovače

Průběh amplitudy elektroakustického signálu na výstupu zesilovače musí odpovídat průběhu amplitudy vstupního signálu. V takovém případě hovoříme o lineární přenosové charakteristice zesilovače. Ačkoli podmínka linearity je v každém elektroakustickém zařízení stavěna na prvořadé místo, není přesto u nízkofrekvenčního zesilovače problém linearity tak jednoznačný. Každý zesilovač vyšší jakostní třídy je opatřen především různými kmitočtovými korektory, ať již ve formě plynulých regulátorů anebo skokově zařaditelných filtrů; u převážné většiny zesilovačů je regulátor hlasitosti navržen tak, aby při zeslabování signálu upravoval vhodným způsobem kmitočtovou charakteristiku přístroje (viz kapitola o regulátoru hlasitosti) a v praxi tedy téměř nepřipadá v úvahu, že bychom poslouchali reprodukováný signál, zesílený přesně lineárně. U zesilovače, který je (kromě reproduktorových soustav) prakticky na konci celého elektroakustického řetězce, se naopak žádá, aby upravil elektroakustický signál pro připojené reproduktory tak, aby výsledná reprodukce byla při každé nastavené hlasitosti co nej příjemnější a aby co nejvíce vyhovovala subjektivnímu vjemu jakostního poslechu.

V každém případě však zesilovač musí splňovat základní podmínku přenosu celé šířky akustického pásma kmitočtů, tj. v případě jakostního zařízení v rozsahu 30 až 20 000 Hz. To je však požadavek z hlediska moderní obvodové



techniky snadno splnitelný vzhledem k tomu, že moderní zesilovače nepoužívají výstupní transformátory. Výstupní transformátory byly totiž vždy prvky zesilovače, které nejvíce omezovaly kmitočtovou charakteristiku.

Vstupní citlivost zesilovačů

Moderní zesilovače bývají převážně vybaveny otočnými anebo tlačítkovými přepínači vstupních obvodů. Přepínače umožňují trvalé připojení jednotlivých zdrojů signálu a jejich rychlou volbu. V následujícím textu si probereme jednotlivé nejčastěji používané vstupy zesilovačů a jejich požadované vlastnosti.

Vstup pro připojení gramofonové přenosky

Tento vstup je možno realizovat dvojím způsobem; jednak jako vstup pro připojení přenosky amplitudové (krystalové, keramické), a jednak jako vstup pro připojení přenosky rychlostní (dynamické, magnetodynamické). Vstup pro přenosku amplitudovou má mít tyto vlastnosti:

citlivost pro plné vybuzení zesilovače (při 1 kHz): asi 40 až 100 mV,

impedance vstupu: 1 až 3 MΩ,

kmitočtová charakteristika: lineární.

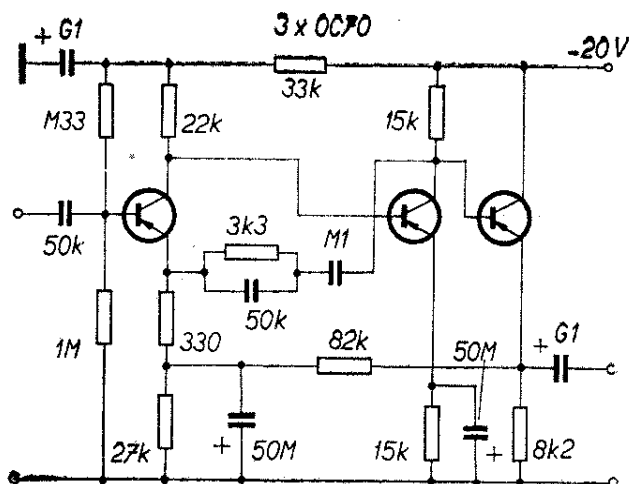
Vstup pro připojení rychlostní přenosky má mít tyto vlastnosti:

citlivost pro plné vybuzení zesilovače (při 1 kHz): asi 4 až 10 mV,

impedance vstupu: 50 kΩ,

kmitočtová charakteristika: křivka RIAA.

Připojení amplitudové přenosky k zesilovači je snadné; přenoska s rychlostním systémem musí být připojena přes korekční předzesilovač, jenž upraví výstupní signál z přenosky ve shodě s jejími fyzikálními vlastnostmi tak, aby se dosáhlo výsledného lineárního průběhu. Mnoho zesilovačů ovšem není opatřeno vstupem pro přímé připojení rychlostní přenosky – v takovém případě je nutno použít externí korekční předzesilovač (obr. 4). Někteří výrobci gramofonů montují tyto předzesilovače přímo do gramofonů, a to buď již při sériové výrobě, nebo na zvláštní přání.



Obr. 4. Korekční předzesilovač

Vstup pro připojení magnetofonu

Vstup pro magnetofon je v podstatě shodný se vstupem pro připojení amplitudové přenosky. Vstupní citlivost je asi 40 až 100 mV, impedance 1 MΩ, průběh lineární.

Vstup pro připojení řídicího rozhlasového přijímače – tuneru

Tento vstup není u zesilovačů řešen zcela jednoznačně. Někdy bývá navržen stejným způsobem jako vstup pro magnetofon, jindy bývá upraven pro větší vstupní napětí (až 1,5 V) nebo je opatřen pomocným odporovým trimrem, jímž lze nastavit citlivost a přizpůsobit ji ostatním zdrojům signálu.

Vstup pro připojení mikrofону

Pokud má zesilovač mikrofonní vstup, pak bývá obvykle uvažován dynamický mikrofón s transformátorem – v tom případě je citlivost mikrofonního vstupu asi 2 až 10 mV a vstupní impedance 50 až 100 kΩ. Pokud však jde o zesilovače pro věrnou reprodukci (Hi-Fi), pak často



mikrofonní vstup vůbec chybí, neboť se jeho použití v domácím prostředí nepředpokládá.

Další vstupy

Některé zesilovače bývají opatřeny navíc ještě dalším vstupem, umožňujícím připojení jiného zdroje, jako je např. další gramofon, popř. další magnetofon – v takovém případě je na přepínači zapojen pomocný vstup pro cizí zdroj. Obvykle jsou údaje tohoto vstupu v podstatě totožné s údaji vstupu pro magnetofon anebo amplitudovou přenosku.

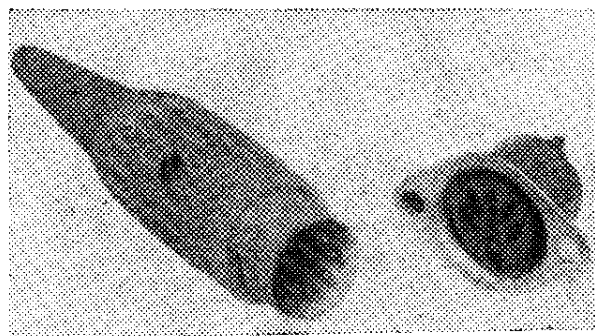
Kromě toho může být zesilovač opatřen ještě vstupem pro připojení ovládacích nebo pomocných zařízení, jako je např. dozvuková jednotka; obvykle se však jedná již o speciální úpravy.

Evropské zesilovače mají vstupní konektory ve formě pětiděrových zásuvek (obr. 5), které jsou mezinárodně normalizovány a umožňují tak vzájemnou záměnnost. Stejně jako rozměry jsou normalizovány i způsoby zapojení těchto zásuvek, takže i v tomto směru je zajištěna univerzálnost použití. V zámořských zemích se však dodnes používají jednoúčelové jednoduché soustředné konektory, které jsou sice jednoduché, avšak vyžadují pro komplikovanější propojení přílišné množství kabelů a zástrček. Vzájemné propojení těchto zesilovačů a např. evropských zdrojů signálu působí potíže.

Vlastnosti výstupních obvodů zesilovačů

Výstupní obvod zesilovače je určen pro připojení reproduktoru nebo reproduktorové soustavy. Vlastnosti výstupního obvodu můžeme charakterizovat kromě výkonu ještě vnitřní impedancí a optimální zatěžovací impedancí.

Optimální zatěžovací impedance zesilovače je udána výrobcem zařízení a vztahuje se na použitý reproduktor nebo reproduktorovou soustavu. Její velikost se během času ustálila na 4, 8 nebo 16 Ω . Zesilovač je schopen odevzdat maximální výkon při minimálním zkreslení pouze tehdy, souhlasí-li (nebo se příliš neliší)

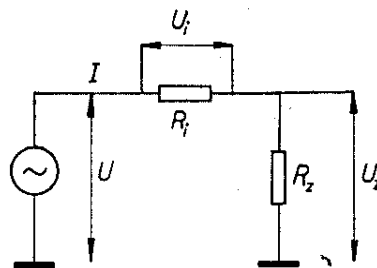


Obr. 5. Normalizovaná pětikolíková zásuvka a zástrčka (konektor)

impedance reproduktoru od předepsané zatěžovací impedance.

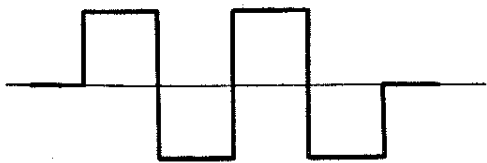
Naproti tomu vnitřní (též nazývaná výstupní) impedance zesilovače musí být u jakostního zesilovače vždy podstatně menší než impedance zatěžovací. Je to jednak proto, aby její velikost – sériově zařazená k zatěžovací impedanci – zbytečně neomezovala výstupní výkon v zátěži (obr. 6), a jednak proto, že malá výstupní impedance zesilovače velmi účinně tlumí všechny zákmitové jevy a podílí se velmi příznivě na výsledné kvalitě reprodukce.

Přivedeme-li na vstup zesilovače nebo jiného čtyřpólu signál, který skokem změní svoji amplitudu (např. úder do bicích nástrojů apod.), pak by i tato náhlá změna měla být v přesné podobě přenesena až na výstup. Při měření improvizujeme takový případ zavedením napětí obdélníkovitého průběhu (obr. 7). Pokud je zařízení v pořádku, mělo by se na výstupních svorkách objevit zesílené napětí shodného průběhu. Objeví-li se však na výstupu na původním tvaru napětí nové kmitočty v podobě, jak ukazuje obr. 8, pak hovoříme o vzniku zákmitů. Vznik podobných zákmitů má za následek určitou sluchovou změnu

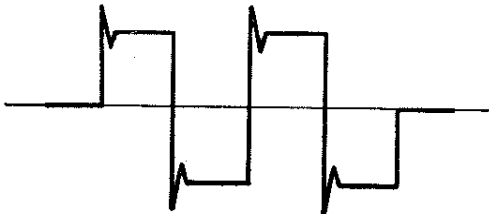


Obr. 6. Náhradní schéma koncového stupně pro vnitřní a zatěžovací odpor

$$6 \cdot \frac{4}{70} R_K$$



Obr. 7. Napětí obdélníkovitého průběhu



Obr. 8. Napětí obdélníkovitého průběhu, deformované zákmitovými jevy

v charakteru přenášeného signálu a v každém případě bude naší snahou, abychom jeho vzniku zabránili. Tyto zákmity jsou v podstatě tlumené oscilace na určitém kmitočtu a bývají způsobeny nestabilitou některého prvku zesilovače.

Na závěr této kapitoly důležitou připomínku.

U elektronkových zesilovačů se nedoporučuje ponechat odpojenou zátěž (tj. reproduktory). V takovém případě by při plném vybuzení zesilovače mohlo velmi snadno dojít k průrazu výstupního transformátoru.

Pokud není u zesilovače zavedena dostatečně velká záporná zpětná vazba, pak je obvykle i výstupní impedance zesilovače poměrně značná. Odpojíme-li reproduktory anebo jinou zátěž (např. při měření), zvětší se napětí na výstupním transformátoru natolik, že při okamžité napěťové špičce může dosáhnout takové velikosti, kdy dojde k průrazu. To platí především u velmi výkonných zesilovačů.

U tranzistorových zesilovačů se nedoporučuje naopak zkratovat výstupní svorky, nebo je např. zatížit příliš malou zatěžovací impedancí.

Zesilovače osazené tranzistory (pracující bez výstupního transformátoru) jsou v případě zkratu na výstupních svorkách ohroženy nikoli zvětšením napětí, jako tomu je u zesilovačů elektronkových, ale přílišným zvětšením proudu v koncových tranzistorech. Pokud není v zesilovači za-

vedena účinná ochrana, může dojít při plném vybuzení ve velmi krátké době ke zničení koncových tranzistorů.

Také pro reproduktorové výstupy se u zesilovačů používají normalizované zásuvky (jeden plochý a jeden válcový kolík). V mimoevropských oblastech se připojení reproduktorů řeší velmi často kontaktními šrouby.

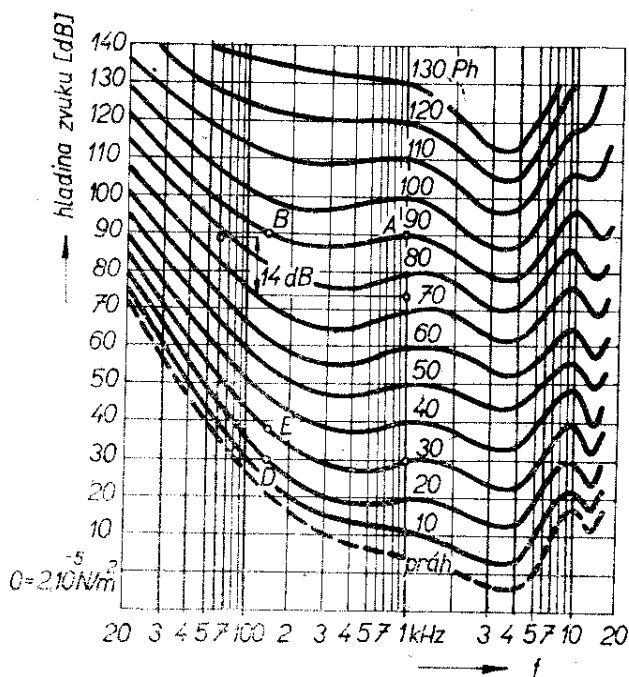
Kromě výstupů pro reproduktory jsou moderní zesilovače opatřeny často navíc ještě výstupy pro dynamická sluchátka. Používá se obvykle shodný výstupní obvod jako pro reproduktory pouze s tím rozdílem, že se výstupní signál odebírá z napěťového děliče, neboť sluchátka vyžadují pouze nepatrný zlomek příkonu reproduktorových soustav.

Všeobecné požadavky na vlastnosti zesilovačů

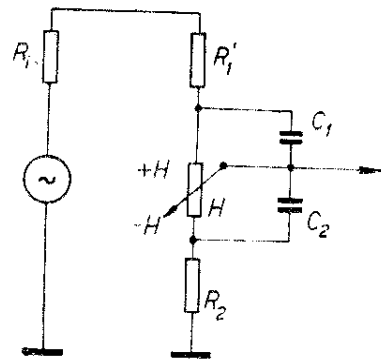
Již v úvodu jsme naznačili základní požadavky na kvalitní přenos elektroakustického signálu v zesilovači. Zmínili jsme se jak o zkreslení, tak o základních požadavcích lineárního přenosu elektroakustického signálu. V praxi se však na linearitu přenosu kladou zcela odlišné požadavky. Kdyby byly všechny prvky elektroakustického řetězce (tj. mikrofon, záznamové a reprodukční zařízení, zesilovač a reproduktorové soustavy) naprosto lineární a kdyby poslechový prostor odpovídal svými akustickými vlastnostmi vlastnostem prostoru, kde byl záznam pořizován, a kdyby i hlasitost poslechu odpovídala originálu, pak by byl požadavek lineární přenosové charakteristiky oprávněný. V praxi tomu tak ovšem nikdy není a ani nemůže být. Linearitu můžeme zajistit všemi články elektroakustického řetězce, které mají čistě elektrický charakter. Podstatně horší je to již s mikrofony a reproduktory. Navíc se však objevují i další vlivy. Např. se značně liší gramofonové záznamy ve vyrovnanosti hlubokých a vysokých kmitočtů, neboť záznam je do jisté míry závislý na subjektivním citění záznamových techniků. Rovněž celkový charakter každé nahrávky může být odlišný. Navíc reproduktorové soustavy nemají nikdy dokonale vyrov-

nanou kmitočtovou charakteristiku, jejich vyzařovací směrové vlastnosti rovněž neodpovídají vlastnostem hudebních nástrojů a domácí poslechové prostory mají útlum zcela odlišný (v závislosti na kmitočtu) od útlumu v koncertní síni. Nelze opomenout ani vlastnosti lidského ucha, které má fyziologický nedostatek v tom, že při menších hlasitostech vnímá hluboké a nejvyšší tóny podstatně hůře, takže dochází k dojmu kmitočtové nevyváženosti reprodukce. (Aby byl tento nedostatek odstraněn, musí se regulátor hlasitosti kombinovat s obvodem, jenž při zmenšování hlasitosti nezeslabuje všechny kmitočty rovnoměrně. Obvod musí zeslabovat pásmo mezi 2 až 4 kHz podstatně více než okraje pásma a tak kompenzovat křivku slyšitelnosti ucha (obr. 9) – fyziologická regulace hlasitosti).

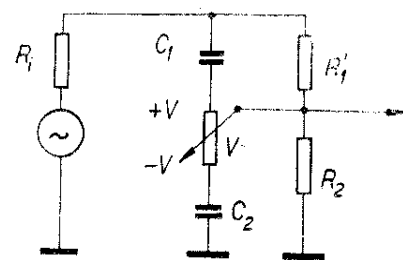
Ze všech těchto důvodů je nemožné a také nežádoucí zachovat pro dobrý poslechový vjem lineární charakteristiku zesilovače. Naopak, ve většině případů je nutné přenosovou charakteristiku vhodným způsobem upravit tak, aby výsledný akustický dojem byl nejbližší přímému poslechu. Avšak i toto poslední tvrzení je velmi problematické, neboť v domácích podmínkách se skutečnému koncertnímu dojmu nelze přiblížit prakticky v žádném



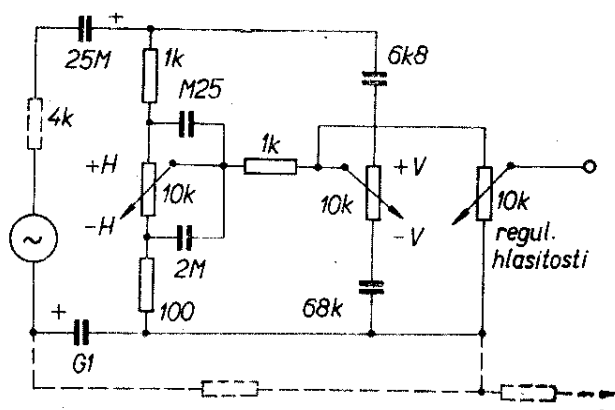
Obr. 9. Fletcher-Munsonovy křivky slyšitelnosti



Obr. 10. Jednoduchý korektor hloubek



Obr. 11. Jednoduchý korektor výšek



Obr. 12. Kombinovaný korekční obvod

případě. Jde tedy spíše o vytvoření subjektivního vjemu, který nám dává pocit uspokojení z jakosti reprodukováného záznamu.

Aby všechny uvedené požadavky na nf zesilovač a jakostní reprodukci byly splnitelné, stalo se již samozřejmostí vybavovat všechny zesilovače pro kvalitní reprodukci možností úprav kmitočtových charakteristik. K těmto účelům se používají plynulé nebo skokové regulátory hlubokých a vysokých tónů (obr. 10, 11 a 12), dále regulátory hlasitosti, kom-

binované s obvodem pro fyziologickou úpravu kmitočtové charakteristiky a popř. další obvody, jako jsou např. filtr proti dunění, šumové filtry, přesměrní filtry i jiné.

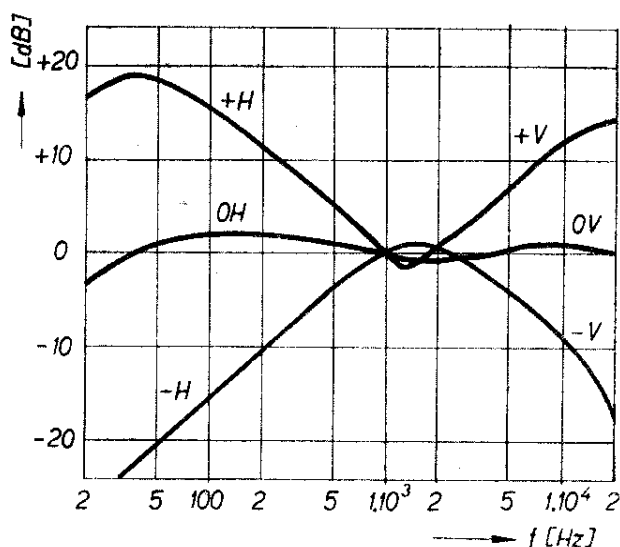
Regulátory kmitočtových charakteristik zesilovačů

Regulátory umožňují změnu kmitočtové charakteristiky zesilovače tak, jak je třeba k dosažení uspokojivého akustického vjemu. Bývají to většinou plynule nastavitelné potenciometry nebo proměnné odpory a bývají obvykle dva – pro regulaci obsahu hlubokých a pro regulaci obsahu vysokých kmitočtů v reprodukci. Pokud jsou korekční obvody (ovládané těmito regulátory) správně navrženy, střed přenášeného kmitočtového pásma zůstává při regulaci prakticky nedotčen. S výhodou lze realizovat tyto regulátory jako tzv. skokové regulátory pomocí přepínačů. Regulace je pak přesnější, umožňuje dokonce přesnou indikaci velikosti zdvihu, popř. útlumu části kmitočtového pásma a především dovoluje pro určitý případ snadnou reprodukovatelnost nejvýhodnějšího nastavení. Konstrukčně je ovšem skoková regulace podstatně nákladnější.

Běžně používané korektory jsou tzv. dvoupásmové, tj. jeden regulační prvek slouží k regulaci hlubokých a druhý k regulaci vysokých kmitočtů. Je-li korektor správně navržen, má mít zesilovač při střední poloze regulačních prvků přibližně lineární přenosovou charakteristiku. V obou krajních polohách regulačních prvků by se měly zdůrazňovat nebo potlačovat okrajové oblasti akustického pásma o 15 až 20 dB (obr. 13).

Některé speciální zesilovače jsou opatřeny dokonce tří- i vícepásmovou regulací; v takovém zapojení se však velmi obtížně dosahuje toho, aby se regulační prvky vzájemně neovlivňovaly a obsluha regulačních prvků je pro nespecializovaného obsluhivatele velmi náročná. Dvoupásmová regulace je z těchto důvodů dosud nejrozšířenější.

Jako korektory kmitočtových charakteristik mohou sloužit jednak pouze pasiv-



Obr. 13. Kmitočtový průběh dvoupásmového korekčního obvodu (obr. 12)

ní prvky (odpory, kondenzátory apod.), a jednak pasivní prvky ve spojení se zesilovacími (aktivními) prvky. Někdy se používají i tzv. zpětnovazební korektory. V praxi se však regulátory častěji vyskytují jako samostatné pasivní členy, což i v opravářské praxi přináší určitá zjednodušení.

Regulátory hlasitosti s fyziologickým průběhem

Úkolem regulátoru hlasitosti na zesilovači je umožnit nastavení nejvhodnější poslechové hlasitosti reprodukce. Jak jsme si již předběžně vysvětlili, je nutné při nastavení menší hlasitosti upravit přenosovou charakteristiku zesilovače podle vlastností lidského ucha tak, aby byl výsledný subjektivní vjem nezávislý na hlasitosti reprodukce. Závislost vjemu na hlasitosti je dána tzv. Fletcher-Munsonovými křivkami (obr. 9). I tehdy, je-li brán při konstrukci zřetel na tyto křivky, může dojít k „nepřesnostem“. Jak vyplývá z obr. 9, odpovídá určitý kmitočtový průběh vždy určité hlasitosti. V praxi to znamená, že fyziologická korekce, navržená co nejpřesněji podle výpočtu, bude správná jediné tehdy, bude-li mít napětí zdroje na vstupu zesilovače určitou jmenovitou velikost. Připojíme-li na určitý vstup zesilovače např. magnetofon, který „odevzdává“ maximální napětí 500 mV,

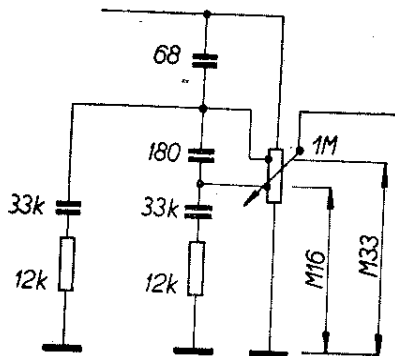
a pak na stejně citlivý vstup gramofonní přenosky, jejíž maximální signál je asi 1,2 V, pak je jasné, že pro stejnou výslednou hlasitost reprodukce budeme nuceni zvolit jinou polohu regulátoru hlasitosti. Je zřejmé, že v obou případech se bude kmitočtový průběh reprodukováného signálu lišit v důsledku změněné fyziologické charakteristiky.

Pro dokonalou funkci fyziologické regulace hlasitosti bychom museli splnit podmínku jednotné vstupní úrovně pro všechny zdroje signálu (a navíc ještě podmínku její jednotné maximální velikosti), což by vyžadovalo přinejmenším individuální „předběžné“ regulátory na každém vstupu s možností pevného nastavení. Protože toto uspořádání nebývá běžné, musíme i fyziologickou regulaci hlasitosti brát pouze jako snahu po přiblížení se dobrému reprodukčnímu vjemu.

Protože může v praxi nastat případ, kdy (třeba z uvedených důvodů) může být fyziologická regulace na závalu, existuje mnoho zesilovačů, u nichž se dá tento obvod odpojit z funkce (např. stisknutím tlačítka s označením LINEAR anebo jiným způsobem). Jednoduché zapojení regulátoru hlasitosti s fyziologickým průběhem je na obr. 14.

Doplňkové obvody nf zesilovačů

Dalším konstrukčním prvkem, jenž se používá u některých zesilovačů, je filtr proti dunění při gramofonní reprodukci. Tento filtr je v podstatě článek RC, ostře odřezávající nejhlubší kmitočty; někdy bývá řešen i jako dvoustupňový, čímž se umožní volba dvou mezních spodních



Obr. 14. Fyziologický regulátor hlasitosti

kmitočtů. Použití tohoto filtru má v praxi řadu problémů, ačkoli by se na první pohled zdálo, že je velmi účelné. Mezní kmitočty filtru bývají asi 40, popř. 60 Hz. Znamená to, že by měly být nižší kmitočty než 40, popř. 60 Hz velmi ostře odříznuty. Filtr se používá proto, že u gramofonních šasi běžné jakosti není dokonale vyřešen mechanický převod mezi hnacím motorkem a talířem (popř. ani závěs motorku) a chvění motorku se přenáší až do snímacích systémů přenosky a v reprodukci se pak projevuje jako dunění a hluk. Kmitočtová oblast tohoto dunění je obvykle v okolí 50 a 25 Hz.

Uvedené filtry však jednak nebývají tak strmé, aby tuto nejhlubší kmitočtovou oblast ostře odřízly, aniž by citelně nezeslabil celý spodní okraj přenášeného kmitočtového pásma, jednak většina středních a malých reproduktorových soustav má již v této oblasti dosti malou účinnost, takže tvoří jakýsi vlastní filtr. A pokud používáme jakostní reproduktorové soustavy, které jsou schopny vyzářit i signál na spodním konci přenášeného pásma (v okolí 30 Hz), pak se spíše snažíme tuto oblast akusticky využít – a ne ji potlačovat. Je podstatně výhodnější zlepšit mechanické vlastnosti použitého gramofonu a jeho vlastní dunění zmenšit, než zcela pasivně odřezávat jinak užitečné pásmo.

Podobně je tomu i s filtry proti šumu. Mnoho zesilovačů bývá opatřeno těmito filtry; potlačují se jimi signály vysokých kmitočtů. Většinou jde buď o články typu LC nebo RC s větší strmostí. Důvody pro používání těchto filtrů jsou ještě pochybnější. Dá se předpokládat, že nikdo nebude využívat kvalitního nízkofrekvenčního zesilovače a reproduktorových soustav k reprodukci amplitudově modulovaných rozhlasových signálů nebo starých standardních gramofonových desek (78 ot/min) – a v jiných případech odřezávání nejvyšších kmitočtů tímto způ-



sobem nemá nejmenší opodstatnění. Pokud některé firmy do svých zařízení montují podobné doplňkové obvody, jde ve většině případů o obchodní, popř. propagační důvody.

Kombinovaný filtr je na obr. 15.

Na okraj problematiky těchto doplňkových obvodů ještě poznámku. U všech výrobků, technických i netechnických, se vždy určitým způsobem projevuje móda. U spotřebních výrobků technického charakteru charakterizuje vliv módy obvykle objevení nějakého dosud neobvyklého prvku – většinou se však až po delší době používání a dalším vývoji ukáže, zda jde o skutečný technický přínos, nebo o pouhý módní výstřelek. I u nf zesilovačů se občas objevují podobné módní prvky, které často postupem času opět zmizí stejně rychle, jak rychle se objevily. Z poslední doby jmenujme alespoň obvod, nazývaný „presence“. Jakýsi horlivý teoretik objevil, že když se v reprodukci zdůrazní pásmo kmitočtů v okolí 3 kHz, vznikne při reprodukci dojem bezprostřednosti. Něco podobného ovšem přišlo na svět již dříve pod označením SÓLO; této novince se začalo říkat PRESENCE. Jisté je, že každá změna kmitočtové charakteristiky vždy působí změnu v posle-

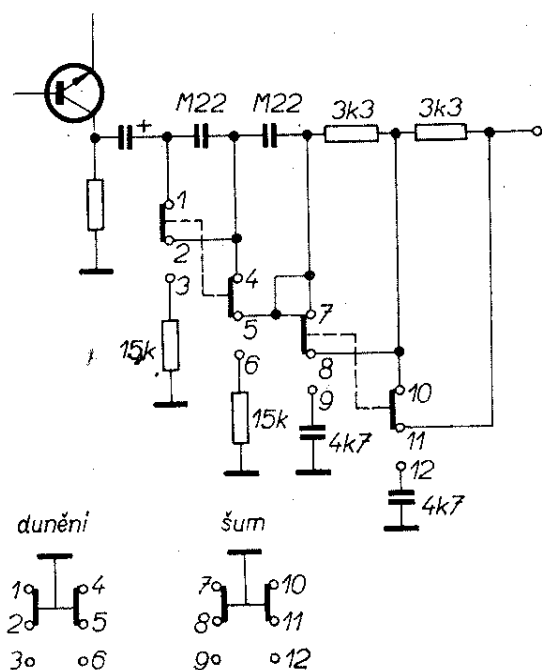
chovém vjemu. Stejně tak i zařazení uvedených prvků (sólo, presence) změnilo poněkud charakter reprodukce – nikdo však nedovedl říci s jistotou, co tyto prvky přinášejí pro věrnost reprodukce. Je si třeba zásadně uvědomit, že akustický vjem je vždy záležitost velmi a čistě subjektivní a jako takový že závisí na řadě nevažitelných a neměřitelných okolností; kromě toho není nepodstatná ani otázka návyku. Budeme-li porovnávat několik špičkových reprodukčních zařízení v různých místech nebo místnostech, pak vždy najdeme mezi jednotlivými případy určité rozdíly v reprodukci a jen velmi obtížně bychom se mohli okamžitě rozhodnout, kdy byla reprodukce nejlepší. A pokud si na určitý typ reprodukce navykneme, jakýkoli jiný typ se nám bude zdát při okamžitém srovnání „nějak divný“. Proto je zcela na místě být velmi opatrný v konečném hodnocení víceméně pomyslných efektů, poplatných navíc i módě.

Stereofonní nf zesilovače

Všeobecně lze říci, že pokud dnes hovoříme o zesilovačích pro věrnou reprodukci, pak předpokládáme obvykle stereofonní provedení. Protože však stereofonní zesilovače mají oproti monofonním určité odlišnosti, popíšeme si v následujícím textu ty prvky, v nichž se stereofonní přístroje liší od monofonních.

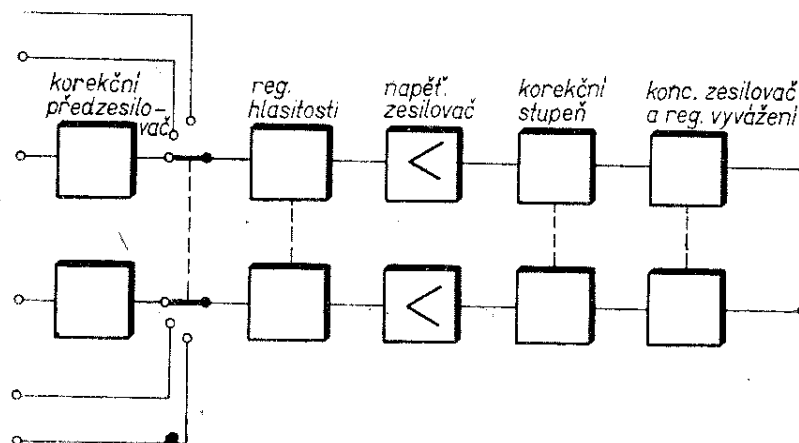
V běžné domácí praxi převládá dnes dvoukanálová stereofonie. Znamená to v podstatě maximální zjednodušení stereofonního principu, tj. rozdělení celé informace do dvou informací základních, přenášených a reprodukováných dvěma oddělenými kanály. Stereofonní zesilovač běžné koncepce představuje tedy dva rovnocenné zesilovače, u nichž jsou vzájemně vázány ovládací prvky a u nichž navíc mohou být použity některé doplňující prvky, které se u monofonních zesilovačů nevyskytují (obr. 16).

Společné regulátory hlasitosti a korekcí bývají u stereofonních zesilovačů řešeny dvojími potenciometry. Vzhledem k tomu, že pro zajištění uspokojivého stereofonního dojmu musí být zaručen co nejmenší rozdíl ve vlastnostech obou ka-



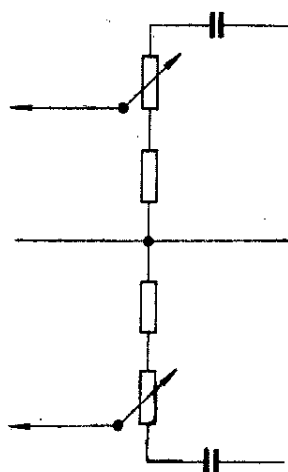
Obr. 15. Kombinovaný filtr proti dunění a šumu

Obr. 16. Blokové schéma stereofonního zesilovače



nálů, musí být i např. vzájemný souběh obou potenciometrů na jednom hřídeli co nejpřesnější. Pro kvalitní zařízení nesmí být odchylka v nastavení tandemového potenciometru (v celém průběhu odporové dráhy) větší než 2 dB. Téměř shodné jsou i požadavky na regulátory tónových korekcí. Vzhledem k tomu, že dodnes není uspokojivý výběr potenciometrů podobných vlastností, uchylují se konstruktéři – a to především u amatérských konstrukcí stereofonních zesilovačů – k použití přepínačů. I když je tento způsob konstrukce regulátorů nákladnější, má výhodu v přesnosti nastavení a především v poměrně dostupné realizovatelnosti. Nežrádka se používá přepínač i pro regulaci hlasitosti.

Novým prvkem, který se objevuje u stereofonních zesilovačů, je regulátor vyvážení kanálů (obr. 17). Je to potenciometr, jímž je možno v určitých mezích měnit zesílení obou kanálů (popř. i stranově



Obr. 17. Zapojení regulátoru vyvážení (stereováhy)

posouvat vjem stereofonní reprodukce). I když tento regulátor anebo jeho náhrada (např. oddělené regulátory hlasitosti obou kanálů) tvoří součást naprosté většiny stereofonních zesilovačů, přece jen se zdá jeho použití do jisté míry problematické. V prvopočátcích stereofonie se totiž tento prvek zavedl asi podobně, jako tónová clona u ostatních elektroakustických zařízení. Jeho funkce se tehdy zdůvodňovala potřebou vyvážení reprodukce stereofonního záznamu, aby byl výsledný dojem symetrický (kdyby nebyl v pořádku některý člen řetězu, nebo kdyby bylo nutno přizpůsobit reprodukci nedostatkům poslechového prostoru). Praxe však toto zdůvodnění spíše popřela. Zatímco na začátku byly pořizovány stereofonní snímky klasikou stereofonní snímací technikou, ukázalo se brzy, že výsledek není takový, jak se očekávalo, a obzvláště v oblasti populární a jazzové hudby se začaly používat podstatně efektnější způsoby záznamu (v některých případech nemá např. po určitou dobu jeden kanál modulaci, což znamená, že se jen značně obtížně určuje přesný střed akustického obrazu). Kromě toho záznamová technika i reprodukční zařízení dosáhly takového stupně dokonalosti, že používání uvedeného regulátoru má dnes spíše symbolický než praktický význam. A pokud jde o poslední důvod k používání regulátoru vyvážení, vyrovnání nedostatků poslechového prostoru, pak je třeba upozornit na to, že tyto nedostatky by se mohly projevit především v rozdílném útlumu, a ten navíc bývá ve většině případů silně kmitočtově závislý, což žádným regulátorem vyvážení zkorrigovat nelze. Domnívám se,

že je daleko výhodnější upravit buď poslechový prostor nebo zvolit vhodný směr poslechu tak, aby k podobným jevům – které ostatně nejsou zdaleka tak časté – nedocházelo.

Jak u zesilovačů pro monofonní reprodukci, tak i u stereofonních přístrojů se čas od času objevují různé novinky, které mají – alespoň podle výrobce – zlepšit výsledný reprodukční dojem. Zmíníme se alespoň o jedné z nich, především proto, že ji před několika lety zavedla jedna z předních evropských firem. V zesilovači byl zařazen obvod, který měl za úkol rozšířit stereofonní bázi u těch zvukových snímků, u nichž by se snad zdál posluchači stereofonní jev příliš nevýrazný. Principem zapojení bylo v podstatě velmi jednoduché přehození polaritý jedné z reproduktorových soustav, tj. obrácení fáze výstupního signálu. Jak je známo, jednou z podmínek správného stereofonního poslechu je správné fázování obou reproduktorových soustav. Při obrácení fáze signálu jednoho kanálu mizí z reprodukčního vjemu střed zvukového obrazu; za určitých okolností se může zdát, že zvuk vychází z prostoru mimo reproduktory; může však dojít i k potlačení hlubokých kmitočtů jako důsledku protifáze a zvuk z takto zapojených reproduktorů nebo reproduktorových soustav může navíc způsobit u posluchače nepříjemný pocit tlaku v uších – rovněž jako důsledek protifáze. V každém případě je tento a podobné způsoby „vylepšování“ reprodukce techniky neseriózní – je proto velmi důležité podobná zapojení a „zlepšení“ nejprve prověřit a teprve potom se rozhodnout pro jejich aplikaci.

Konstrukční provedení zesilovačů

Nízkofrekvenční zesilovače doznaly po zavedení polovodičové techniky oproti dřívější praxi značné změny v konstrukci a uspořádání. Odpadly velmi objemné a těžké součásti jako mohutné síťové a výstupní transformátory, koncové elektronky, usměrňovací elektronky, filtrační tlumivky a podobné prvky, které nutily kdysi konstruktéra, aby u větších zařízení

pokud možno odděloval koncové zesilovače a napájecí díly od napěťového zesilovače a korekčního stupně. I po mechanické stránce se konstrukce značně zjednodušila vzhledem k rozměrům, váze a snadnosti ovládání. Moderní polovodičová technika umožňuje řešit i velmi výkonné zesilovače jako ucelenou kompletní jednotku, popř. i na jediné výklopné desce s plošnými spoji. Pouze výkonové tranzistory bývají umístěny odděleně na chladičích příslušných rozměrů.

Snažil jsem se, aby z těchto úvodních řádek bylo každému zájemci o stavbu nf zesilovače zřejmé, co je a není u nf zesilovačů a při jejich konstrukci podstatné. Čtenáři, který je dosud pod vlivem pověr, které v této oblasti elektroniky panují, bych rád ještě doporučil, aby pozorně přečetl i následující úvahu o subjektivních hlediscích při hodnocení reprodukce. Abych shrnul stručně to, co bylo dosud o nf zesilovačích řečeno: k dobré reprodukci dobrých snímků vyhoví každý i jednoduchý nf zesilovač, který má základní vlastnosti, jež umožňují dostatečně hlasitou a nezkrácenou reprodukci – a samozřejmě i dobré reproduktorové soustavy.

Subjektivní hlediska při hodnocení reprodukce

Pod podobným názvem byl asi před deseti lety uveřejněn ve Sdělovací technice velmi zajímavý článek. Ačkoli se v něm pojednávalo prakticky pouze o subjektivních dojmech posluchačů reprodukované hudby, byl přesto poměrně ostře v následujícím čísle odsouzen jedním z našich odborníků. Druhý pisatel tehdy tvrdil, že je dostatek objektivních měřicích metod a že subjektivní posudky tudíž nemají plné oprávnění. To je však velký omyl. Stejně tak, jako přes veškeré snahy a vědecké teorie se nenajde nikdo, kdo by vymyslel přesnou definici např. pojmů „krásný obraz, dokonalá fotografie“ apod. a velmi obtížně se bude někdy diferencovat mezi uměním a kýčem; nemůže i největší odborník jednoznačně posoudit určitý druh či jakost reprodukce. Většinou pak dojde – a to se již stalo – k trapným omylům, kdy dá svůj pochvalný hlas

při anonymním hodnocení té reprodukční soustavy, o níž se třeba na základě objektivních měření vyjadřoval zcela záporně.

Až doposud hovoříme pouze o subjektivních vjemech, které jsou vždy u každého jedince ovlivněny jeho okamžitým duševním stavem, náladou, u nichž hraje podstatnou roli i návyk na určitý druh a jakost reprodukce. Je např. velmi dobře známo, že řada profesionálních hudebníků, nezvyklých poslechu reprodukováné hudby, není vůbec schopna pronášet alespoň relativně logické soudy o jakosti reprodukováné hudby atd.

Vezměme však v úvahu i některé ryze technické otázky reprodukčního řetězce, které dodnes v sobě skrývají řadu nejasností. Jako příklad použijme obecně známou zkoušku zesilovače napětím obdélníkovitého průběhu. V učebnicích elektroakustiky (a nejenom v nich) se dozvíme, že podmínkou nedeformovaného přenosu signálu obdélníkovitého průběhu o opakovacím kmitočtu f je:

a) přenosová charakteristika minimálně od $1/10f$ do $10f$,

b) zařízení, které nesmí být náchylné k zakmitávání,

c) lineární přenosová charakteristika.

Z uvedeného vyplývá, že každý jakostní nf zesilovač, který může přenést signály o kmitočtu alespoň 100 až 10 000 Hz, musí přenést signál obdélníkovitého průběhu bez zřetelné deformace.

Deformuje-li zesilovač Hi-Fi průběh zkušební obdélníkovitého nf signálu, nenajde se asi nikdo, kdo by jakost takového přístroje zcela jednoznačně neodsoudil.

Vezměme však magnetofon, který slouží jako jeden ze zdrojů signálu, jímž napájíme zesilovač, a zkusme nahrát na pásek napětí obdélníkovitého průběhu. To, co se objeví na výstupu magnetofonu, bude pro mnohé velkým překvapením. Výsledný patvar se totiž jednak tvarově nepodobá původnímu obdélníku, a jednak obsahuje vždy řadu zákmitů. Vzhledem ke způsobu korigování magnetického záznamu je tento důsledek ovšem pochopitelný.

Uvažujme nyní gramofon. Gramofonová přenoska vyšší jakosti (a dnešní

konstrukce) snímá zcela spolehlivě zaznamenané signály od 30 do 15 000 Hz. Jestliže bychom zhotovili gramofonovou desku se záznamem napětí obdélníkovitého tvaru s opakovacím kmitočtem 1 000 Hz, mělo by být možné spolehlivě tento záznam reprodukovat. Bylo by ovšem velmi zajímavé zjistit, která fyzikální síla světa by donutila hrot záznamové přenosky, aby „opisoval“ obdélníkovitý průběh zaznamenávaného napětí.

A tak se naskytá otázka: jak je to vlastně se zkouškou napětím obdélníkovitého tvaru? Nemí-li ani gramofon ani magnetofon schopen reprodukovat obdélníkovitý signál v čisté formě, proč vyžadujeme na zesilovači, aby měl tuto vlastnost?

Pro doplnění této nelogičnosti můžeme posloužit i příkladem z poválečné doby, kdy fanoušci reprodukováné hudby vyráběli nízkofrekvenční zesilovače podle pana Williamsona. Zkreslení u těchto zesilovačů bylo řádově desetiný procenta – reprodukováné standardní desky měly však zkreslení od 5 do 20 % (u středu) – a všichni si libovali, jaký mají výborný zesilovač a proto i věrnou reprodukci.

Závěrem této úvahy bych se rád zmínil ještě o reproduktorech, jako závěrečném článku elektroakustického řetězce. Dostáváme se opět do oblasti, v níž řada těžko měřitelných prvků může ovlivnit výsledný sluchový dojem (vjem) tak, že se tento vjem může dostat i do přímého rozporu s naměřenými údaji. Je velmi dobře známo, že existuje řada tzv. objektivních metod k měření reproduktorů a že měření jedné reproduktorové soustavy (či reproduktoru) různými metodami může dát a také dává odlišné výsledky. Tyto výsledky nemusí zdaleka souhlasit se skutečným sluchovým dojmem. Není žádným tajemstvím, že všechny větší firmy, zabývající se touto problematikou, konají pravidelné poslechové zkoušky – ty jsou pro ně v podstatě rozhodujícím činitelem, jak pro vývoj, tak pro výrobu a prodej. Měření slouží tedy víceméně jako relativní informace.

Konečně ještě jeden fakt z praxe: předvedeme-li skupině osob dva určité typy reprodukce, A a B, může se polovině z nich zdát lepší typ A, zatímco druhé po-

lovině typ reprodukce B a měřením třeba žádné vyložené výrazné rozdíly nalezeny nebyly. Faktem zůstává, že asi nikdo nemění skutečnost, že konečné hodnocení reprodukce zůstane z velké části zcela subjektivní a to především proto, že výsledným posuzovatelem elektroakustického produktu je lidský jedinec se svými návyky, náladami, zkušenostmi apod.

Měření nf zesilovačů

Všeobecně

Jako u většiny elektronických zařízení, tak i u nf zesilovačů při všech kontrolách, opravách nebo dílčích měřeních postupujeme odzadu dopředu. Každý nf zesilovač můžeme v podstatě rozdělit na několik dílčích obvodů:

- a) koncové stupně,
- b) budicí stupně (bývají většinou součástí koncových stupňů),
- c) korekční obvody,
- d) vstupní zesilovače,
- e) mikrofonní nebo gramofonní předzesilovače.

Po opravách nebo při kontrolách měříme většinou nf zesilovač jako celek. Zjistíme-li však při tomto měření jakoukoli závadu, pak musíme měřit postupně všechny uvedené dílčí obvody, abychom mohli závadu identifikovat, určit a odstranit.

Hlavní zásady při měření

Elektronkové zesilovače, především pak zesilovače s velkým výstupním výkonem nikdy nezapojujeme bez příslušné zátěže. Jak jsme se již dříve zmínili, mohlo by dojít k náhodnému průrazu výstupního transformátoru a tím k nesnadno odstranitelné závadě. Při práci s výkonnými tranzistorovými přístroji je pak třeba dbát toho, abychom při měření nezpůsobili na výstupu zesilovače náhodný zkrat, neboť v tom případě bychom mohli ohrozit život drahých koncových tranzistorů.

Přístroje a pomůcky nutné pro měření zesilovačů

K měření obvykle potřebujeme: tónový generátor, nízkofrekvenční milivoltmetr, osciloskop, měřič zkreslení.

Měření výstupního výkonu

Toto měření se vždy kombinuje s měřením zkreslení, protože výstupní výkon každého zesilovače závisí na velikosti dovoleného zkreslení výstupního signálu. Záleží pouze na tom, zda hodláme měřit s laboratorní přesností, nebo informativně zjistit s postačitelou praktickou přesností maximum výstupního výkonu při zanedbatelném zkreslení. Jak víme, u většiny zesilovačů probíhá křivka velikosti zkreslení v závislosti na výstupním výkonu velmi lineárně, až v určitém okamžiku nastává poměrně velmi prudký vzestup zkreslení při poměrně malé změně výstupního výkonu (obr. 1).

Oblast této změny je poměrně úzká a pro praktickou informaci plně postačuje.

Informativní změření výstupního výkonu zesilovače

Na vstup měřeného zesilovače připojíme tónový generátor. Protože je vždy výhodné měřit výstupní výkon při lineární přenosové charakteristice, nastavíme regulátor hlasitosti naplno, abychom vyřadili případnou fyziologickou korekci. Rovněž regulátory tónových korekcí nastavíme do střední polohy. Dbáme dále, aby nebyly zařazeny žádné další tónové filtry. Na výstup zesilovače připojíme zátěž, odpovídající předepsané zatěžovací impedanci. Paralelně k této zátěži zapojíme nízkofrekvenční milivoltmetr a osciloskop.

Na tónovém generátoru, jehož signál přivedeme do libovolného vstupu (kromě vstupu pro rychlostní přenosku), nastavíme kmitočet asi 1 000 Hz a postupně zvětšujeme výstupní napětí. Až se začne

deformovat sinusový průběh signálu (pozorujeme na osciloskopu), zjistíme nízkofrekvenčním voltmetrem velikost výstupního napětí na zatěžovací impedanci. Podle vztahu

$$P = \frac{U^2}{R} \quad [W; V, \Omega]$$

vypočítáme snadno výstupní výkon. (P je výkon, U je napětí na zátěži a R je odpor, popř. impedance zátěže). Zbývá připomenout, že pozorovatelná deformace sinusového signálu na obrazovce osciloskopu nastává přibližně při zkreslení 5 %. Odečteme-li však od takto zjištěného výstupního výkonu přibližně 20 %, pak výsledný údaj odpovídá (podle obvyklého průběhu křivky zkreslení) přibližně výstupnímu výkonu pro zkreslení 1 %.

Tato metoda, která je velmi rychlá a pro praxi zcela postačitelně přesná, by však nemusela vyhovovat v případě, kdy by se jednalo o naprosto přesné měření, popř. při konfrontování určitých změn v zapojení a jejich důsledků apod. V takovém případě musíme použít exaktní metodu, která ovšem klade vyšší nároky jak na měření samotné, tak i na jeho uspořádání.

Přesné měření výstupního výkonu zesilovače

Základní zapojení zůstává v podstatě shodné s předchozím; musíme si však uvědomit, že velmi jakostní zesilovač pro Hi-Fi reprodukci může mít zkreslení při plném výkonu řádu desetin % – to je již zkreslení zcela srovnatelné se zkreslením výstupního signálu běžného tónového generátoru. Proto není často možné připojovat v takovém případě tónový generátor přímo k zesilovači. Obvykle se mezi generátor a měřený zesilovač zařazuje dolní propust, která odřízne vyšší harmonické kmitočty signálu generátoru a zmenší (např. o řád) výstupní zkreslení nf signálu z tónového generátoru. Aby měření bylo skutečně seriózní, musíme se dále přesvědčit, že přenosová charakteristika (především při vyšších kmitočtech) je skutečně lineární, neboť její nelinearita by

mohla ovlivnit procento vyšších harmonických kmitočtů a tím i výsledek měření. Na výstup zesilovače (kromě zátěže) však již nestačí připojit pouze osciloskop, neboť jeho optický údaj není natolik přesný, aby nám dovolil zjistit zkreslení okolo jednoho procenta. K určení zkreslení musíme proto použít speciální přístroj, tzv. měřič zkreslení.

Měřič zkreslení je v podstatě zařízení, které dovoluje oddělit v měřeném signálu základní kmitočet od jeho vyšších harmonických a vzájemný poměr obou složek vyhodnotit v %.

Při měření postupujeme tak, že obvykle zvětšujeme vstupní napětí daného kmitočtu, např. 1 000 Hz, a současně měříme zkreslení výstupního signálu. Když výstupní zkreslení dosáhne velikosti udávané výrobcem, zjistíme současně velikost signálu na zátěži. Podle již uvedeného vztahu vypočítáme pak pro zjištěné zkreslení velikost výstupního výkonu.

K zajištění přesnosti měření a pro zjištění celkové „výkonové“ charakteristiky zesilovače bývá obvykle nutné celé měření opakovat ještě při některém kmitočtu v dolním a horním okraji pásma. Tedy např. na kmitočtu 60 Hz a 10 000 Hz. Pak měření poskytuje úplný obraz o zkreslení a výstupním výkonu měřeného zesilovače.

Měření vstupní citlivosti

Protože jsme již zjistili maximální výstupní výkon zesilovače a protože známe potřebné výstupní napětí na zátěži pro tento výkon, můžeme velmi snadno zjistit vstupní napětí na jednotlivých vstupech, při nichž je výstupní výkon maximální. Zapojení přístrojů při tomto měření je opět shodné s předešlým pouze s tím rozdílem, že můžeme vyřadit měřič zkreslení, popř. osciloskop a dolní propust na vstupu. Zůstává tedy pouze nízkofrekvenční milivoltmetr, zapojený paralelně k zátěži a na vstupu tónový generátor. Opět nastavíme na tónovém generátoru kmitočet asi 1 000 Hz a zavádíme ho postupně na všechny vstupy zesilovače. Výstupní napětí generátoru nastavíme vždy tak, aby napětí na zatěžovacím odporu odpovídalo maximálnímu výkonu. Napětí tónového

generátoru na jednotlivých vstupech odpovídá pak jejich jmenovité vstupní citlivosti.

Připomínáme pouze dodržení polohy regulátoru hlasitosti „naplno“ a regulátorů tónových korekcí ve středové poloze.

Měření kmitočtové charakteristiky

Jak jsme si již v minulých kapitolách vysvětlili, neklademe v praxi na lineární průběh přenosové charakteristiky zesilovače zdaleka takové nároky, jako např. u magnetofonu. I když ve většině případů používáme při poslechu alespoň v malé míře základní korekce a zařazujeme fyziologický regulátor hlasitosti, přesto je účelné kontrolovat přenosovou charakteristiku alespoň informativně. Přitom je nutné zjistit rozsahy korektorů, jejich maximální zdvihy a útlumy, jejich vliv na střed pásma a vliv fyziologické regulace na kmitočtovou charakteristiku při různých hlasitostech reprodukce.

Měření kmitočtových charakteristik se proto u zesilovačů vyšší třídy neomezuje jen na zjištění základního kmitočtového průběhu, ale spíše na kontrolu a ověření výše uvedených vlastností. Měření můžeme proto rozdělit na tyto dílčí úkony:

a) měření kmitočtové charakteristiky bez korekcí,

b) měření kmitočtové charakteristiky při maximálním zdvihu hloubek i výšek,

c) měření kmitočtové charakteristiky při maximálním potlačení hloubek i výšek,

d) měření kmitočtové charakteristiky bez korekcí a při různých polohách regulátoru hlasitosti,

e) měření kmitočtové charakteristiky při zařazení různých filtrů (podle individuální konstrukce zesilovače).

Z uvedeného přehledu vidíme, že kompletní měření zesilovačů je poměrně velmi zdoluhavé a proto k němu přistupujeme v plném rozsahu pouze při základních konstrukčních měřeních. Jinak se obvykle spokojujeme pouze s informativním měřením.

Při měření kmitočtových charakteristik potřebujeme tónový generátor, jmenovitou zátěž (odpor), nízkofrekvenční mili-

voltmetr, popř. i osciloskop. Uspořádání přístrojů je prakticky shodné s předchozím měřením. Osciloskop na výstupu zesilovače je vhodný pouze k trvalé kontrole linearitě přenášeného signálu. Při korekcích nastavených na maximální zdvih by se totiž mohlo stát, že by byl v některé okrajové oblasti zesilovač přebuzen. Z téhož důvodu je nutné volit výstupní napětí tónového generátoru pouze takové velikosti, aby v žádném případě (ani při maximálním zdůraznění okrajů přenášeného pásma korekčními obvody) nemohlo dojít k přebuzení koncového stupně. Pracovní postup při měření kompletních kmitočtových charakteristik můžeme volit např. takto:

a) nastavíme regulátor hlasitosti na maximum, regulátory korekcí do střední polohy, vstupní napětí asi 10 až 15 dB pod úroveň maximální citlivosti; změříme první charakteristiku;

b) regulátor hlasitosti na maximum, regulátory korekcí do polohy maximálního útlumu, vstupní napětí asi 10 až 15 dB pod úroveň maximální citlivosti; změříme druhou charakteristiku;

c) regulátor hlasitosti na maximum, regulátory korekcí do polohy maximálního zdvihu, vstupní napětí asi 30 dB pod úroveň maximální citlivosti; změříme třetí charakteristiku.

Při všech měřeních proměříme vždy skokově celé pásmo přenášených kmitočtů podle předem zvolené kmitočtové řady; např. při 30, 40, 60, 120, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000, 10 000, 12 000, 15 000 a 18 000 Hz. Pro každý kmitočet zaznamenáváme napětí na výstupu zesilovače. Touto měřicí metodou lze získat obraz o celkové přenosové charakteristice zesilovače i o mezních křivkách korektorů hloubek a výšek. Zbývá ještě ověření průběhu fyziologické regulace hlasitosti:

d) nastavíme regulátory tónových korekcí do střední polohy a regulátor hlasitosti na maximum. Vstupní napětí volíme asi 10 dB pod úroveň maximální citlivosti.

Měřením obdržíme průběh shodný s průběhem podle a). Nyní nastavíme na tónovém generátoru kmitočet 1 000 Hz a regulátorem hlasitosti při nezměněném vstupním napětí zmenšíme napětí na výstupu zesilovače o 10 dB.

Znovu proměříme celé akustické pásmo a výstupní napětí zapíšeme do tabulky. Zmenšíme úroveň výstupního signálu 1 000 Hz regulátorem hlasitosti o dalších 10 dB, změříme celé akustické pásmo a tak postupujeme až k útlumu např. 50 dB. Vyneseme-li výsledky do diagramu, obdržíme velmi názorně průběhy fyziologické regulace hlasitosti.

Všechna výše uvedená měření jsme uvažovali jako konstrukčně informativní a nevyhneme se jim obvykle v průběhu stavby jakéhokoli zesilovače. Z tohoto důvodu jsou též v některých případech poměrně jednoduchá. Některá popsána měření jsou vhodná i pro podrobná měření zesilovačů Hi-Fi. Měření, závazná pro jakostní zesilovače Hi-Fi, předepisuje podrobně západoněmecká norma. Protože však tato norma, označená jako DIN 45 500, není obecně zcela známá a protože velmi účelně shrnuje všechny závažné požadavky na jakostní zařízení, považujeme za účelné zveřejnit v závěru první části této příručky její obsah, pokud se týká zesilovačů. Z toho důvodu jsme nepopisovali taková měření, která jsou v plném rozsahu popsána v uvedené normě.

Měření na zesilovačích pro věrnou reprodukci podle normy DIN 45 500

Zesilovače pro věrnou reprodukci (Hi-Fi) mají i po delší době provozu anebo po opravách trvale splňovat určité minimální kvalitativní požadavky, které jsou obsaženy v normě DIN 45 500, list 6. V této normě jsou shrnuty minimální požadavky, které dovolují zařadit zesilovač do skupiny zařízení Hi-Fi.

Aby bylo možné zodpovědně přistoupit ke všem nutným měřením, je třeba seznámit se se všemi základními pojmy i principy měření. Protože požadavky na Hi-Fi se často nalézají na hranici měřitelnosti přístrojů standardní výbavy, je třeba všem měřením věnovat obzvláštní péči, abychom se vyvarovali chybných výsledků.

Jak již bylo řečeno, účelem uvedené normy je zajistit kupujícímu určitý přesně definovaný stupeň jakosti, pokud si zakoupí zařízení, označené zkratkou

Hi-Fi. Pro úplnost zbývá pouze dodat, že uvedené minimální požadavky (přes svou přísnost) bývají u většiny Hi-Fi zařízení špičkových firem nejen dodržovány, ale i překračovány.

Norma 45 500 obsahuje tyto listy:

- list 1 – Všeobecné podmínky
- 2 – Tunery VKV
- 3 – Magnetofony
- 4 – Gramofony
- 5 – Mikrofony
- 6 – Zesilovače
- 7 – Reprodukory
- 8 – Kombinace

List 1 udává např. klimatické podmínky, při nichž musí být dosaženy předepsané vlastnosti:

teplota okolí: 15 až 35 °C,

relativní vlhkost vzduchu: 45 až 75 %,

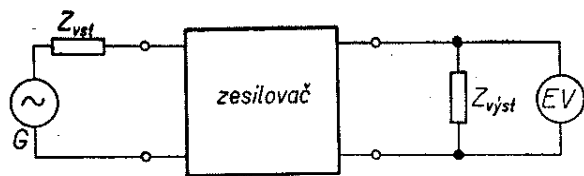
tlak vzduchu: 860 až 1 060 milibarů.

Minimální jakostní podmínky pro Hi-Fi zesilovače jsou v listu 6.

Přenášené pásmo

Pod tímto pojmem rozumíme šířku kmitočtového pásma, tj. kmitočty, které je zesilovač schopen přenést za předpokladu předem stanovené amplitudové odchylky oproti určitému referenčnímu kmitočtu v okolí 1 000 Hz. Přitom musí být nastaveny všechny regulátory (hloubek, výšek) tak, aby uvedená podmínka byla splněna. Výstup zesilovače musí být při tomto měření zatížen předepsanou zatěžovací impedancí. Na vstupu zesilovače je třeba učinit takové opatření, aby výstupní impedance použitého tónového generátoru byla doplněna takovým článkem, který by vytvořil impedanční charakter zdroje, připojovaného na daný vstup. Regulátor hlasitosti musí být při tomto měření nastaven na maximum. Měřicí pracoviště je na obr. 18. Je třeba zdůraznit, že např. zatěžovací impedance nesmí být ovlivněna použitím nevhodných stíněných kabelů anebo vlastními kapacitami připojených měřicích přístrojů.

Samozřejmým předpokladem pro toto měření je stabilita amplitudy napětí tónového generátoru v celém kmitočtovém rozsahu, v němž budeme měřit. Totéž pla-



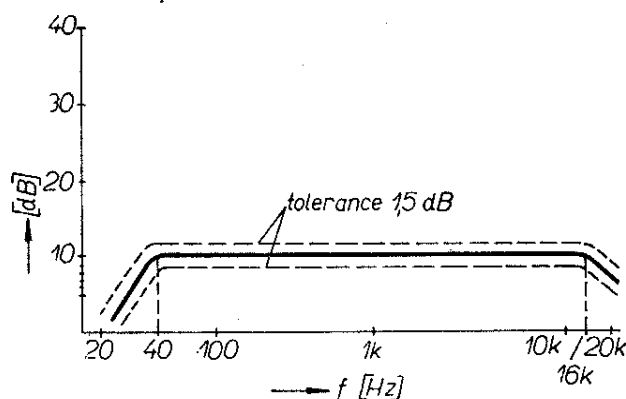
Obr. 18. Uspořádání pracoviště k měření kmitočtové (přenosové) charakteristiky zesilovače

tí i o linearitě výstupního voltmetru. Jestliže měřený nf zesilovač má odpovídat normě 45 500, musí splňovat tyto minimální požadavky:

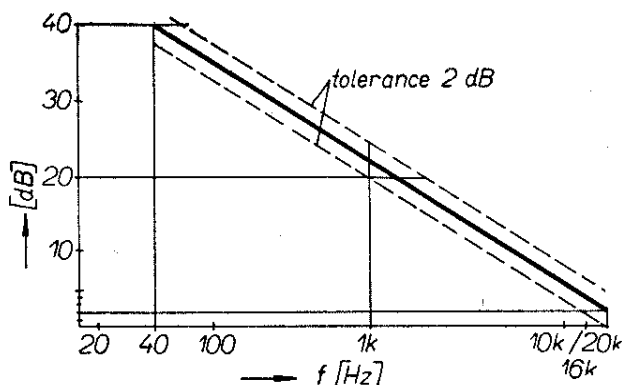
- kmitočtový rozsah musí být alespoň od 40 do 16 000 Hz;
- největší amplitudová odchylka u vstupů s lineárním průběhem nesmí přesáhnout $\pm 1,5$ dB;
- největší amplitudová odchylka u vstupů s nelineárním průběhem (magnetická přenoska) nesmí přesáhnout $\pm 2,0$ dB.

Vždy se měří signálem o 6 dB pod úrovní maximálního napětí, které odpovídá vybuzení zesilovače na jmenovitý výkon. Obr. 19 a 20 ukazují dovolené odchylky při lineárním a korigovaném vstupu.

Při měření speciálních předzesilovačů pro magnetické přenosky, které se připojují k zatěžovací impedanci (tj. ke vstupní impedanci následujícího stupně) asi 470 k Ω , by se již při připojení jakéhokoli měřicího přístroje mohly objevit nežádoucí kapacity, které by ovlivnily přesnost měření. V takovém případě postupujeme tak, že na výstup měřeného předzesilovače zapojíme napěťový dělič, který



Obr. 19. Přenosová charakteristika zesilovače s lineárními vstupy



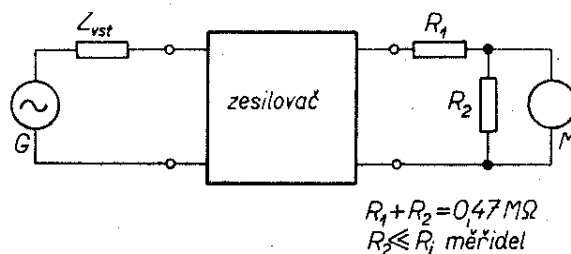
Obr. 20. Přenosová charakteristika zesilovače se vstupy s korekcemi

volíme tak, aby se výsledná impedance rovnala zatěžovací impedanci následujícího stupně, tj. 470 k Ω . Z dělicího bodu napěťového děliče odebíráme napětí k měření na takové impedanci, při níž se již případné kapacity či vstupní impedance připojených měřicích přístrojů neprojeví.

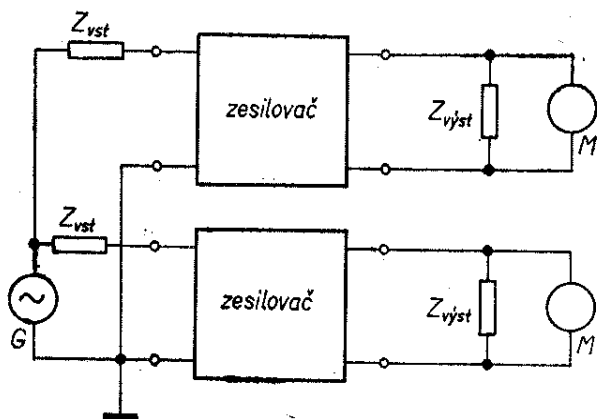
Obr. 21 ukazuje takové uspořádání, při němž je zaručeno, že měřicí přístroj v žádném případě nemůže ovlivnit přesnost měření.

Rozdíly v přenosových charakteristikách stereofonních zesilovačů

V této kapitole normy se pojednává o maximálně přípustných odchylkách zesilovačů, používaných pro stereofonní reprodukci. Při tom musí být na vstup obou kanálů přivedeno shodné vstupní napětí. Postup měření je shodný s předchozím pouze s tím rozdílem, že na výstup každého kanálu je připojen samostatný měřicí přístroj (obr. 22).



Obr. 21. Uspořádání přístrojů k měření zesilovačů s výstupy s velkou impedancí

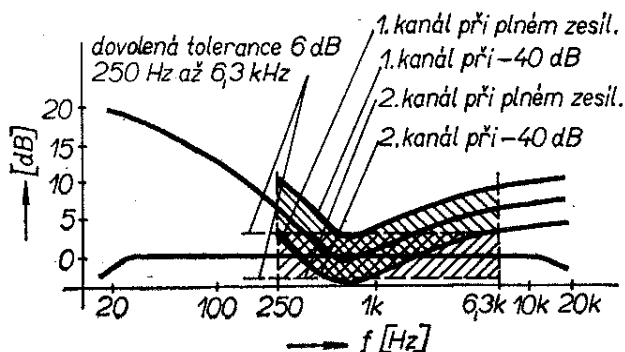


Obr. 22. Uspořádání k měření vlastností kanálů u stereofonních zesilovačů

Podle DIN 45 500 musí být splněny následující požadavky:

- největší rozdíly mezi kanály nesmí přesahovat 3 dB. U zařízení s regulátorem vyvážení, jehož rozsah překračuje 8 dB, je dovolena odchylka až 6 dB;
- uvedená podmínka platí pro rozsah kmitočtů od 250 Hz do 6,3 kHz. Měří se při napětí o 6 dB menším, než odpovídá napětí při jmenovitém výkonu;
- pokud je v měřeném řetězci zařazen regulátor hlasitosti, musí být uvedené podmínky splněny v rozsahu od nastavené maximální hlasitosti až do útlumu —40 dB.

Obr. 23 ukazuje kmitočtový průběh dvou kanálů zesilovače a jejich toleranční pole při zařazeném fyziologickém regulátoru hlasitosti a to při plném zesílení a při útlumu —40 dB. (Přístroj je opatřen regulátorem vyvážení, jehož regulační rozsah přesahuje 8 dB). Jiné požadavky jsou však na stereofonní předzesilovač pro magnetickou přenosku. Protože tento



Obr. 23. Tolerance kmitočtové charakteristiky při malých hlasitostech reprodukce

předzesilovač není opatřen regulátorem vyvážení, nesmí být vzájemná odchylka kanálů větší než 3 dB.

Regulátor vyvážení umožňuje vyrovnání rozdílů zesílení obou kanálů stereofonního zesilovače. Jeho pomocí měníme zesílení v celém kmitočtovém rozsahu a to tak, že se u jednoho kanálu zesílení zvětšuje a v druhém zmenšuje. Součet výkonů obou zesilovačů má při této úpravě zůstat konstantní.

Výše uvedené požadavky slouží k tomu, aby nebyl při změně hlasitosti ovlivněn základní stereofonní vjem reprodukce, nebo aby nedocházelo k strannému posuvu pouze v určité kmitočtové oblasti.

Nelineární zkreslení

Tímto pojmem označujeme souhrnně činitel zkreslení a činitel intermodulačního zkreslení. Obě uvedené veličiny jsou měřítkem jakosti zesilovače.

Činitel zkreslení

Norma DIN 45 500 stanoví, jaká může být maximální velikost činitele zkreslení, aby byl tvar přenášeného sinusového signálu nezkreslený. Přivedeme-li na vstup zesilovače střídavé napětí sinusového průběhu, pak jeho průchodem zesilovačem dojde vždy k určité deformaci základního sinusového tvaru. Tato vlastnost je způsobena nelinearitou přenosových charakteristik jednotlivých prvků. Následkem této nelinearity se objevují ve výsledném signálu nežádoucí kmitočtové komponenty, měnící základní tvar signálu.

Při měření činitele zkreslení zesilovače, opatřeného regulátory zesílení a kmitočtových charakteristik, je třeba nastavit tyto prvky tak, aby byl zajištěn lineární průběh přenosové charakteristiky. Vstup a výstup zesilovače je třeba zatížit předepsanými impedancemi.

V praxi používáme dvě měřicí metody, které se vzájemně liší použitými měřicími přístroji:

1. Měření jednotlivých vyšších harmonických kmitočtů (f_1, f_2, f_3 atd.) a jejich

součtu, přičemž se prakticky neuplatňují cizí rušivá napětí a neovlivňují v žádném případě výsledek měření. K tomuto měření se používá kmitočtový analyzátor.

2. Měření celkového činitele zkreslení měřičem zkreslení, který vyhodnocuje poměr všech vyšších harmonických kmitočtů k základnímu kmitočtu. Při tomto měření se mohou (ačkoli je jednodušší) uplatnit nejrůznější rušivá napětí.

Tónový generátor, používaný pro měření zkreslení, musí mít pouze velmi nepatrné zkreslení vlastního signálu.

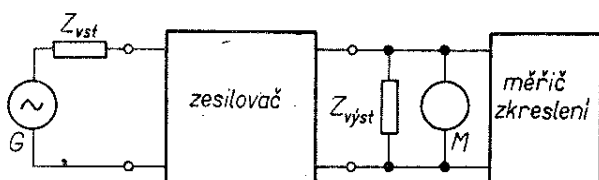
Měřič zkreslení se může pro určitý zesilovač použít pouze za předpokladu, že může být na výstup zesilovače připojen při dodržení předepsané zatěžovací impedance. Jestliže k měření použijeme kmitočtový analyzátor, pak při definované velikosti základního signálového napětí a jeho kmitočtu zjišťujeme velikost amplitudy jednotlivých harmonických kmitočtů a výsledné zkreslení vypočteme ze vztahu

$$K_{\text{celk}} = \frac{\sqrt{U_{f_2}^2 + U_{f_3}^2 + U_{f_u}^2 \dots}}{\sqrt{U_{f_1}^2 + U_{f_2}^2 + U_{f_3}^2 + U_{f_t}^2 \dots}} \cdot 100 \%,$$

kde U_{f_1} je napětí základního harmonického kmitočtu a

$U_{f_2}, U_{f_3}, \dots, U_{f_u}, U_{f_t}$ napětí vyšších harmonických kmitočtů.

Při měření můstkovým měřičem zkreslení obdržíme po vyfiltrování základního harmonického kmitočtu přímo celkový činitel zkreslení. Uspořádání přístrojů při tomto měření je na obr. 24. Norma DIN 45 500 činí rozdíl mezi nejvyšším přípustným zkreslením u předzesilovačů (tj. napěťových zesilovačů) a zesilovačů výkonu.



Obr. 24. Uspořádání přístrojů k měření zkreslení

Předzesilovač

– činitel zkreslení nesmí být v rozsahu od 40 Hz do 4 kHz a při plném vybuzení větší 1 %.

Výkonový zesilovač

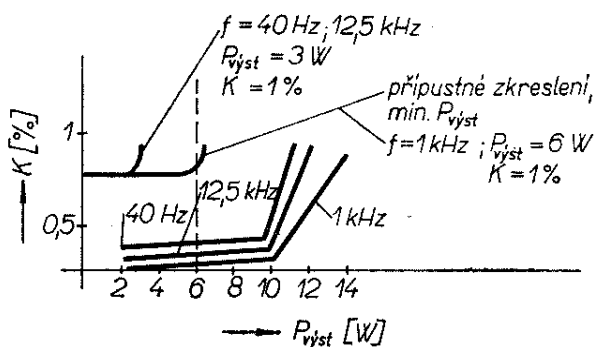
– činitel zkreslení smí být nejvýše 1 % při šířce přenášeného pásma 40 Hz až 12,5 kHz a při výstupním výkonu min. 10 W pro monofonní a min. 2×6 W pro stereofonní provoz.

Typický průběh činitele zkreslení v závislosti na výstupním výkonu u jakostního zesilovače Hi-Fi je na obr. 25. V obrázku je též vyznačen největší dovolený činitel zkreslení.

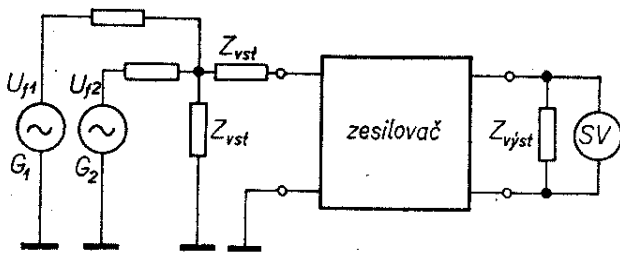
Stanovením největšího přípustného činitele zkreslení dosáhneme toho, že v reprodukci nebudou nežádoucí kmitočtové složky, které by mohly narušit jakost a barvu původního signálu.

Činitel intermodulačního zkreslení

Právě tak jako činitel zkreslení je i činitel intermodulačního zkreslení měřítkem jakosti reprodukce elektricky přenášených informací. Při měření činitele zkreslení se vyhodnocuje podíl nově vzniklých kmitočtů v základním signálu, zatímco při měření intermodulačního zkreslení se ze dvou základních na vstup přivedených signálů zjišťuje množství nově vzniklých kombinačních kmitočtů. Tyto kombinační kmitočty vznikají shodně s vyššími harmonickými kmitočty vlivem nelineárních charakteristik přenosových článků.



Obr. 25. Typický průběh zkreslení u zesilovačů Hi-Fi



Obr. 26. Uspořádání přístrojů k měření intermodulačního zkreslení

K měření intermodulačního zkreslení je nutno dodržet stejné zásady (impedanční přizpůsobení), jako při měření zkreslení.

Při měření tohoto druhu zkreslení je na vstup měřeného zesilovače přiváděn jeden signál nízkého kmitočtu f_1 a poměrně velkého napětí U_1 a jeden signál vysokého kmitočtu f_2 a poměrně malého napětí U_2 . Obsahuje-li měřené zařízení nelineární členy, pak na jeho výstupu kromě uvedených dvou kmitočtů nalezneme ještě kmitočty kombinační, z nichž některé měříme selektivními voltmetry k dalšímu vyhodnocení. Schéma tohoto měření je na obr. 26.

uvedené měření byla normalizována: $f_1 = 250$ Hz; $f_2 = 8\,000$ Hz. Napětí kmitočtu f_1 se volí čtyřnásobně velké oproti napětí kmitočtu f_2 . Obr. 27 ukazuje schematicky kmitočty, které kombinačně vznikají.

Při měření intermodulačního činitele zkreslení je třeba dbát na správnou velikost vybuzení zesilovače. Z tohoto důvodu se velikost napětí nižšího kmitočtu f_1 nastaví pouze na 80 % napětí, potřebného pro měření. Na druhém tónovém generátoru se nastaví napětí kmitočtu f_2 na 20 % napětí kmitočtu f_1 . Pak měříme na výstupu zesilovače kmitočtovým analyzátozem s dostatečně úzkou šířkou pásma napětí U_{f_2} a napětí kombinačních kmitočtů

$$U_{f_2 + f_1}, U_{f_2 + 2f_1}, U_{f_2 + 3f_1}, U_{f_2 + 4f_1}, \text{ atd. a } U_{f_2 - f_1}, U_{f_2 - 2f_1}, U_{f_2 - 3f_1}, U_{f_2 - 4f_1} \text{ atd.}$$

Tuto řadu lze sice libovolně prodloužit, avšak zařazení dalších členů nepřináší nijak podstatněji přesnější výsledek.

Základní vzorec pro intermodulační zkreslení

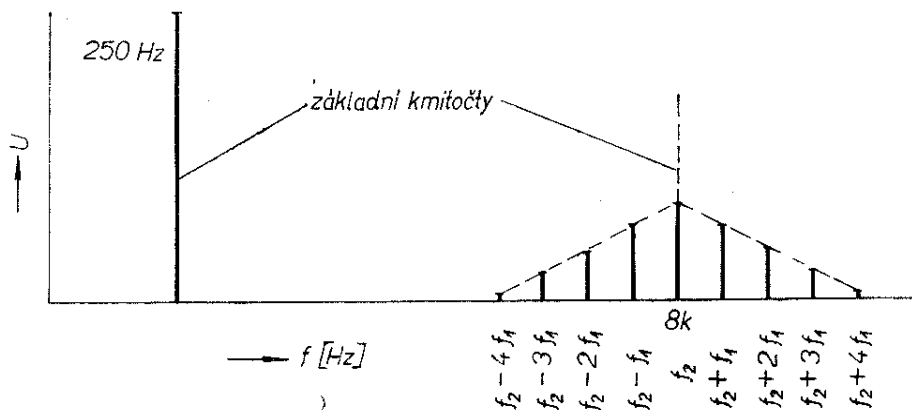
$$m = \frac{\sqrt{(U_{f_2 - f_1} + U_{f_2 + f_1})^2 + (U_{f_2 + 2f_1} + U_{f_2 - 2f_1})^2 + (U_{f_2 + 3f_1} + U_{f_2 - 3f_1})^2 + (U_{f_2 + 4f_1} + U_{f_2 - 4f_1})^2}}{U_{f_2}}$$

Kmitočty f_1 a f_2 jsou voleny tak, aby vyšší kmitočet f_2 „ležel“ se svými intermodulačními produkty ještě zcela spolehlivě v pásmu přenášených akustických kmitočtů a aby se případné vyšší harmonické kmitočty nižšího kmitočtu f_1 ještě nedostaly do oblasti intermodulačních produktů f_2 . Kombinace kmitočtů pro

kde m je intermodulační zkreslení v %, U_{f_2} napětí kmitočtu f_2 , $U_{f_2 - f_1}$ napětí kmitočtu $f_2 - f_1$, $U_{f_2 + 2f_1}$ napětí kmitočtu $f_2 + 2f_1$ atd.

Podle DIN 45 500 smí být intermodulační činitel zesilovače nejvýše 3 %. Měří se při maximálním vybuzení zesilovače s poměrem obou kmitočtů 4 : 1.

Obr. 27. Signály kmitočtů, vznikající jako směšovací produkt při intermodulaci



Oproti měření činitele nelineárního zkreslení poskytuje měření činitele intermodulačního zkreslení podstatně přesnější obraz o čistotě reprodukce měřeného přístroje. Produkty, které intermodulací vznikají, nemají totiž k základnímu signálu harmonický vztah a jsou proto v reprodukci pocítovány podstatně nepříjemněji.

Velikost přeslechu

Přeslechem označujeme to napětí, které v případě většího počtu vstupů nebo zesilovacích kanálů jednoho zařízení proniká z jednoho plně vybuzeného vstupu anebo kanálu na druhý vstup anebo kanál.

Přeslech mezi kanály u stereofonních zesilovačů

Jestliže proniká u stereofonního zesilovače část informace levého kanálu do kanálu pravého anebo naopak, hovoříme o přeslechu. K měření přeslechu nastavíme regulační prvky zesilovače na lineární přenosovou charakteristiku a regulátor hlasitosti na maximum. Dbáme rovněž toho, aby byla dodržena optimální zatěžovací impedance zesilovače a aby i vstupní obvod byl upraven podle používaného zdroje. Zesilovač musí být při měření vybuzen na plný výkon. Druhý kanál zesilovače, který musí být upraven na vstupu i na výstupu shodně s prvním kanálem, připojíme k měřicímu přístroji a poměr obou výstupních napětí udává velikost přeslechu.

Velikost přeslechu se udává v decibelech. Na obr. 28 je schéma měření přeslechu stereofonního zesilovače s lineárním vstupem. Podle DIN 45 500 je dovolena velikost přeslechu:

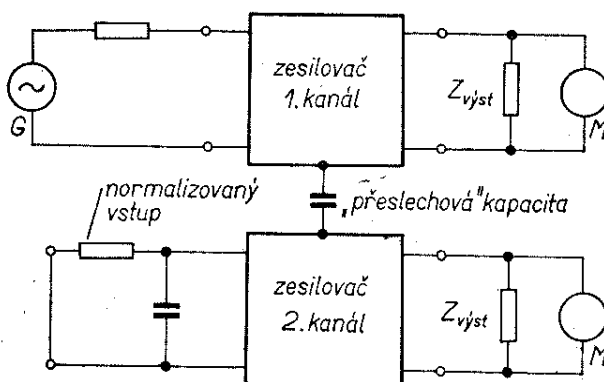
u 1 000 Hz: nejméně 40 dB;

mezi 250 až 10 000 Hz: nejméně 30 dB.

Zjistíme-li tedy obě výstupní napětí U_1 a U_2 , pak přeslech p vypočítáme podle vzorce

$$p = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad [\text{dB}].$$

Jestliže je při nedostatečném odstupu obou kanálů (přeslech menší než 20 dB)

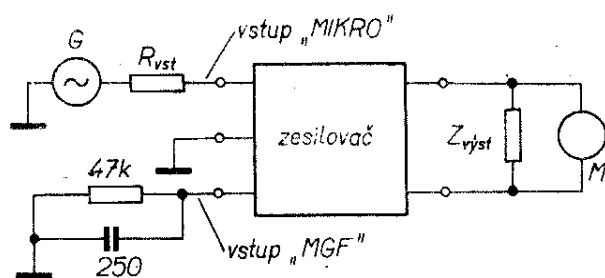


Obr. 28. Uspořádání přístrojů k měření přeslechu

informace obou kanálů smíšena, pak je to vždy na škodu výslednému stereofonnímu vjemu při reprodukci. Jestliže je tomu tak pouze v určitém kmitočtovém pásmu, pak máme při poslechu dojem, jakoby se přesouval akustický obraz v tomto pásmu kmitočtů z jedné strany na druhou. Dodržení podmínek normy v tomto ohledu zaručuje věrnou stereofonní reprodukci.

Přeslech mezi jednotlivými vstupy

U jakostních zařízení musí být rovněž zaručeno, že se nebudou vzájemně mísit signály jednotlivých vstupů, pokud tyto vstupy nejsou „ve funkci“. Uspořádání přístrojů při měření přeslechu mezi vstupy je v podstatě shodné s uspořádáním v předchozím měření. Výstupní obvod zatížíme předepsanou impedancí a všechny v úvahu přicházející vstupní obvody opatříme náhradní impedancí podle charakteru připojovaných zdrojů. Na jeden vstup připojíme tónový generátor a nastavíme takové napětí, které vybudí (při regulátoru hlasitosti nastaveném na maximum) zesilovač na plný výkon. Nyní přepojujeme vstupní obvody a měříme velikost jednotlivých výstupních napětí (na zátěži). Poměr mezi těmito zbytkovými napětími a napětím z plně vybuzeného vstupu udává přeslech mezi jednotlivými vstupy. Pak prostrídáme jednotlivé vstupy a budíme je jeden po druhém a vždy proměříme celou řadu kombinací. Tak dostaneme úplný obraz o vzájemném přeslechu mezi vstupy.



Obr. 29. Měření přeslechů mezi vstupy zesilovače (zesilovač přepnut pro provoz s magnetofonem, odpor 47 k Ω a kondenzátor 250 pF slouží jako náhrada výstupní impedance magnetofonu)

Obr. 29 ukazuje příklad měření přeslechu z mikrofonního vstupu na magnetofonový vstup.

Podle DIN 45 500 musí být dodrženy tyto přeslechy mezi vstupy:

u 1 000 Hz: minimálně 50 dB,
mezi 250 až 10 000 Hz: minimálně 40 dB.

Odstup rušivých napětí

Aby nebyla rušena reprodukce zvukového signálu žádnými nežádoucími pazvuky, jako je brum, šum apod., byla stanovena normou DIN 45 500 maximální přípustná velikost rušivých napětí vzhledem k velikosti užitečného signálu.

Norma DIN 45 500 určuje, že odstup rušivého napětí musí být u předzesilovačů a napěťových zesilovačů minimálně 50 dB (ve vztahu k napětí při plném vybuzení).

Předzesilovač se při měření opatří jmenovitou zatěžovací impedancí a jeho vstup se opatří náhradní impedancí používaného zdroje. Změří se velikost zbytkového napětí na výstupu zesilovače a zjistí jeho poměr k velikosti výstupního napětí při plném vybuzení. Jestliže má předzesilovač možnost změny zesílení, pak musí uvedená podmínka odstupu 50 dB platit až do útlumu (zmenšení zesílení) -20 dB při 1 000 Hz. V tomto případě se ovšem uvažuje i útlum užitečného napětí -20 dB. Velikost rušivého napětí se měří ve špičkové hodnotě!

U výkonových zesilovačů do maximálního výkonu 20 W musí být odstup rušivých napětí nejméně 50 dB, vztaženo na 100 mW celkového výkonu. Tj. při výstupu 4 Ω 2 mV (monofonní zesilovače)

nebo 2 \times 1,4 mV (stereofonní zesilovače). Pro výstup 16 Ω platí dvojnásobné údaje. Regulátor zisku je třeba při měření nastavit tak, aby minimální vstupní napětí podle DIN 45 310 vybudilo zesilovač na výstupní výkon 100 mW, popř. 2 \times 50 mW.

Zesilovače s výstupním výkonem větším než 20 W mohou mít odstup horší a to úměrně se zvětšujícím se výkonem.

Odstup se měří podle normy DIN 45 405. Při měření je třeba zajistit, aby odchylky od lineární charakteristiky nepřesahovaly 4 dB (vzhledem k 1 000 Hz) a to jak při regulátoru hlasitosti naplno, tak až do útlumu -20 dB. Upozorňujeme na nutnost odpojení fyziologické regulace hlasitosti (v případě nutnosti lze její funkci kompenzovat regulátory výšek a hloubek).

Při měření odstupu přivedeme na jednotlivé vstupy taková napětí, která odpovídají podmínkám minimálních vstupních napětí podle normy DIN 45 310; popř. napětí 500 mV pro vstupy s velkými impedancemi (minimální vstupní impedance 500 k Ω). Regulátor hlasitosti nastavíme (u monofonního zesilovače) na 100 mW výstupního výkonu, popř. 2 \times 50 mW u stereofonních zesilovačů. Zkontrolujeme, popř. upravíme přenosovou charakteristiku podle podmínek měření, tj. s maximální odchylkou 4 dB (vzhledem ke kmitočtu 1 000 Hz). Po seřízení musíme znovu nastavit výstupní výkon a tyto úkony je třeba několikrát postupně opakovat, až jsou změny minimální.

Dále je třeba upravit náhradní impedanci na vstupu podle zdroje, který se běžně používá:

pro vstupy s velkou impedancí pro
gramofonní přenosku: 100 k Ω /1 nF,
pro vstupy
rozhlasových tunerů: 47 k Ω /250 pF,
pro magnetickou
gramofonní přenosku: 47 k Ω ,
pro magnetofon: 47 k Ω /250 pF.

Velikost rušivých napětí změřená na výstupu zesilovače v poměru k výstupnímu napětí pro výstupní výkon 100 mW popř. 50 mW udává velikost odstupu (vyjádřeného v decibelech). Rušivá napětí

jsou podle DIN 45 405 definována takto:
 – napětí, změřené bez zařazených psofometrických filtrů, nazýváme rušivým napětím. Pro elektroakustická zařízení s širokým přenosovým pásmem musí být registrována všechna rušivá napětí v pásmu od 31,5 do 20 kHz.

Je-li výstupní výkon zesilovače větší než 20 W, pak smí být odstup rušivých napětí menší než u zesilovačů s menším výstupním výkonem. Jestliže měříme např. zesilovač o výstupním výkonu 40 W, což znamená výkon o 3 dB větší než u zesilovače s výkonem 20 W, pak může být rušivé napětí místo 50 dB pouze 47 dB (o 3 dB menší).

Výstupní výkon

U zesilovačů Hi-Fi, které jsou určeny pro reprodukci v obytných prostorech a které bývají vzhledem k nedostatku místa obvykle opatřeny reproduktory s kombinací poměrně malých rozměrů (a tedy i obvykle malé účinnosti), jsou stanoveny minimální požadavky co do výstupního výkonu. Veškerá měření výstupního výkonu jsou uspořádána stejně jako při měření nelineárního zkreslení. Výstupní výkon se musí udávat pro nelineární zkreslení maximálně 1 %. Totéž platí i o přenášené šířce pásma. Při kmitočtech 40 Hz a 12,5 kHz se musí dosáhnout minimálně polovičního jmenovitého výkonu při zkreslení 1 %.

Minimální požadavky na výstupní výkon podle DIN 45 500:

– výstupní výkon u monofonních zesilovačů: minimálně 10 W,

– výstupní výkon u stereofonních zesilovačů: minimálně 2×6 W.

Uvedený výkon musí zesilovač (při měření sinusovým signálem) dodávat po dobu minimálně 10 minut.

Při měření výstupního výkonu je třeba dbát především na přesnou velikost předepsané optimální zatěžovací impedance. Reprodukce kombinací nahradíme činným odporem předepsané velikosti a jeho ztrátu [W] volíme tak, aby nedošlo při měření ke změně odporu vlivem oteplení. Velikost výstupního výkonu pak vypočítáme z velikosti

zatěžovacího odporu a výstupního napětí a naopak:

$$U_z = \sqrt{P_z R_z}; \quad P_z = \frac{U_z^2}{R_z};$$

kde U_z je výstupní efektivní napětí,
 R_z zatěžovací odpor a
 P_z výstupní výkon.

Činitel útlumu

Tato veličina nám udává, v jakém poměru je velikost zatěžovací impedance výkonového zesilovače k výstupní impedanci zesilovače. Činitel útlumu je definován v rozsahu 40 Hz až 12,5 kHz;

– pro výkonový zesilovač musí být minimálně 3.

To znamená, že v rozsahu 40 až 12 500 Hz musí být výstupní impedance zesilovače menší než jedna třetina zatěžovací impedance.

Činitel útlumu zjišťujeme změřením výstupního napětí naprázdno, tj. bez zatěžovací impedance (odporu) a výstupního napětí na předepsané zatěžovací impedanci (odporu). Princip měření je na obr. 30.

Zjistíme-li podle výše uvedeného způsobu velikost napětí naprázdno U_1 , a napětí na zátěži U_2 pro kmitočty 40 Hz, 1 000 Hz a 12 500 Hz, pak můžeme výstupní impedanci R_i zesilovače vypočítat ze vztahu

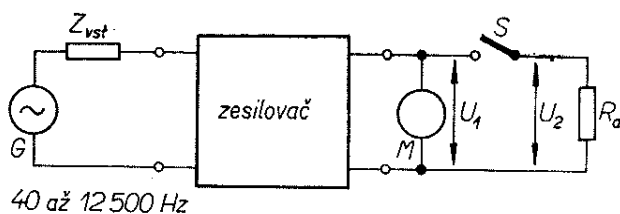
$$R_i = R_z \frac{U_1 - U_2}{U_2},$$

kde R_z je zatěžovací impedance (odpor).

Z poměru zatěžovacího a vnitřního odporu, tj. ze vztahu

$$\frac{R_z}{R_i}$$

obdržíme činitel útlumu.



Obr. 30. Uspořádání ke zjištění činitele útlumu

Vyznačení vlastností zesilovače

Má-li být zesilovač označen jako výrobek, odpovídající normě Hi-Fi 45 500, pak musí jeho dokumentace obsahovat minimálně tyto údaje:

a) jmenovité vstupní napětí všech vstupů.

Jmenovitým napětím vstupů rozumíme takové napětí, které je třeba přivést na jednotlivé vstupy (tuner, mikrofon, gramofon, magnetofon atd.), aby byl koncový stupeň zesilovače vybuzen na plný výkon;

b) impedance jednotlivých vstupů při kmitočtu 1 000 Hz;

c) výstupní výkon zesilovače, měřený sinusovým kmitočtem při dodržení požadavků na zkreslení podle příslušného odstavce normy. Pokud se u zesilovače uvádí navíc tzv. hudební výkon, pak je ho třeba uvést jako dodatečný údaj a tato okolnost musí být zdůrazněna. Pod pojmem hudební výkon označujeme výstupní výkon zesilovače, při němž se nepřekročí zkreslení 1 % a při němž jsou všechna napájecí napětí udržována na téže výši, jakou by měla bez přivedeného signálu;

d) jmenovitý zatěžovací odpor. Jmenovitý zatěžovací odpor je odpor, jímž je zatěžován výstupní obvod zesilovače a k jehož velikosti se vztahují všechny údaje, týkající se výkonu, zkreslení atd.

Dodatek k normě 45 500

V dodatku se hovoří o všeobecně platných podmínkách pro vlastnosti vstupů a výstupů zesilovačů.

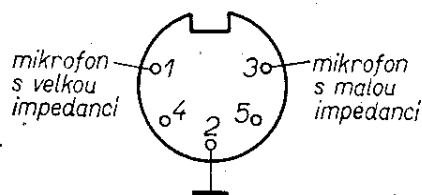
Vstupy

Tento článek obsahuje údaje o uspořádání konektorů a jejich zásuvek. Vstupní napětí, pokud se o nich pojednává, jsou taková napětí, při nichž se dosáhne jmenovitého výstupního napětí. Jmenovitým výstupním napětím rozumíme takové výstupní napětí, které naměříme na zatěžovacím odporu při jmenovitém výstupním výkonu. Jsou-li za vstupy

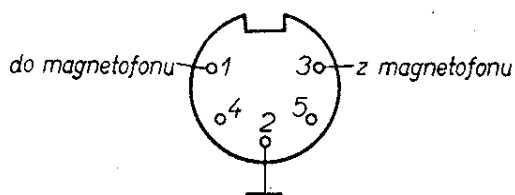
zařazeny regulátory zisku, pak musí být možné zvětšit vstupní napětí až o 12 dB, aniž by se celkové zkreslení zvětšilo nad přípustnou mez, tj. 1 %. Přitom se ovšem regulátorem zmenší o uvedenou hodnotu (tj. o 12 dB) zesílení zesilovače tak, aby výstupní výkon byl opět jmenovitý.

Lineární vstupy

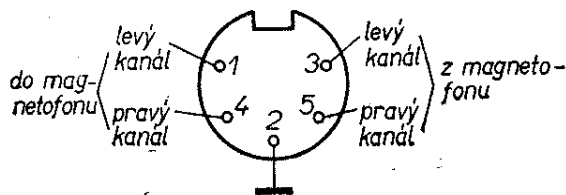
Jmenovité vstupní napětí obvodů s lineární charakteristikou má být maximálně 500 mV. Vstupní odpor má být minimálně 500 kΩ. Zapojení kontaktů na



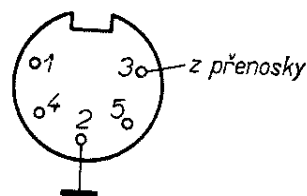
Obr. 31. Zapojení mikrofonní zásuvky



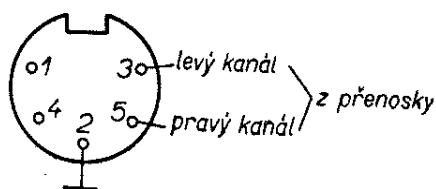
Obr. 32. Zapojení rozhlasové zásuvky (monofonní)



Obr. 33. Zapojení rozhlasové zásuvky (stereofonní)



Obr. 34. Zapojení zásuvky pro gramofon (monofonní)



Obr. 35. Zapojení zásuvky pro gramofon (stereofonní)

zásuvce má odpovídat normě DIN 45 539. Toto zapojení je vyznačeno na obr. 31 až 35.

Výstupy

Pro připojení výstupu předzesilovačů, anebo ostatních zdrojů elektroakustického signálu je třeba používat zástrčky podle DIN 41 524. K připojení reproduktorů nebo reproduktorových soustav k výkonovým zesilovačům je třeba použít zástrčky podle DIN 41 529. Zásuvka podle DIN 41 529 smí však být použita pouze pro střídavá napětí menší než 34 V.

Pro připojení stereofonních sluchátek se používají zásuvky podle DIN 45 327.

Výstup lineárních nebo korekčních předzesilovačů

Výstupní napětí zesilovačů pro mikrofon (lineární) nebo korekčních zesilovačů pro magnetickou přenosku má být větší než 1 V. Výstupní impedance těchto zesilovačů nemá být větší než 47 k Ω . Zapojení kontaktů předepisuje DIN 45 539.

Vstupy pro magnetickou přenosku

Vstupní napětí tohoto předzesilovače, korigovaného podle DIN 45 536, DIN 45 537, DIN 45 546 a DIN 45 547 má být nejvýše 5 mV (na impedanci 47 k Ω). Rozložení kontaktů předepisuje poslední jmenovaná norma.

Výstup pro připojení záznamových přístrojů

Výstupní napětí pro připojení záznamových přístrojů (magnetofonů) má být

0,1 až 2 mV na 1 k Ω zatěžovacího odporu. Při tom se povoluje velikost zatěžovacího odporu 1 k Ω až 50 k Ω . Rozložení kontaktů je podle DIN 45 511 (tab. 1).

Jako dodatečný požadavek se uvádí, že minimálního výstupního napětí (tj. 0,1 mV na 1 k Ω) musí být dosaženo již pro takové vstupní napětí, které je 10 dB pod úrovní jmenovitého vstupního napětí pro určitý vstup.

Výstup pro reproduktory a sluchátka

Jako zatěžovací impedance zesilovače může být volena hodnota z řady 2, 4, 8, 16, 32, 50, 100, 400 a 800 Ω . Tyto zatěžovací impedance jsou voleny tak, aby bylo možno kombinovat různé zesilovače a reproduktory.

Pro reproduktory se doporučují impedance 4 a 8 Ω .

Rozložení kontaktů na zásuvce pro stereofonní sluchátka se volí podle DIN 45 327.

Označení přípojných míst

Jestliže jsou zesilovače opatřeny přípojnými místy, která nejsou použitými zásuvkami zcela jednoznačně definována, je třeba je označit. Jak vyplývá z uvedených minimálních požadavků na přístrojové zásuvky a jmenovitá napětí, neslouží DIN 45 500 pouze jako záruka definované minimální reprodukční jakosti, avšak má za úkol i umožnit vzájemné propojení jednotlivých prvků elektroakustického řetězce. Při tom není nutné, aby tyto členy, tj. gramofon, magnetofon, zesilovač, reproduktory atd. pocházely od jediného výrobce, naopak, pokud jsou požadavky uvedených norem dodrženy, mohou se vzájemně kombinovat libovolné stavební díly libovolných výrobců.



Tab. 1. Normalizované vstupy a výstupy podle normy DIN 45 500

Zdroj signálu	Vstupy				Výstupy						
	Jmen. impedance	Jmen. vst. napětí	Zapojení			Náhradní imp.	Výstupní nap.	Dovolené zatíž.	Zapojení		
			Vý- vod	Mo- no	Stereo				Vý- vod	Mo- no	Stereo
Gramofony s krystal. přen.						100 kΩ 1 nF	min. 500 mV	max. 470 kΩ 100 pF			
Gramofony s magnet. přen.						4,7 kΩ	min. 5 mV	47 kΩ	3 5 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.
Magnetofony	1 kΩ až 47 kΩ	0,1 až 2 mV pro 1 kΩ	1 4 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.	47 kΩ 250 pF	min. 500 mV	max. 470 kΩ 100 pF			
Tuner						47 kΩ 250 pF	min. 500 mV	max. 470 kΩ 100 pF			
Vstup zesilovače pro magnet. přenosky	4,7 kΩ	min. 5 mV	3 5 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.						
Vstup zesilovače pro krystal. přenosky	100 kΩ 1 nF	min. 500 mV	3 5 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.						
Výstup zesilo- vače pro mag- netofon			3 5 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.	1 kΩ/0,1 až 2 mV	0,1 až 2 mV pro 1 kΩ	1 kΩ až 47 kΩ	1 4 2	nf — —	nf levá nf pravá nf spol.
Výstup zesilo- vače pro repro- duktor						1/3 R _{jm} ; přednostně 4 Ω	jmen. výst. napětí	jmen. zatěžo- vací impedance — 20 %	Podle DIN 41 529		
Výstup zesilo- vače pro slu- chátko						podle údajů výrobce, doporučená impedance 400 Ω			Podle DIN 45 327		

Konstrukční část

Stereofonní zesilovač 2×50 W pro nejvyšší nároky

Stereofonní zesilovač univerzálního provedení je základním článkem jak u domácích Hi-Fi reprodukcí, tak i u reprodukcí různých hudebních souborů apod. Díky soustavné pozornosti, kterou této tématice věnují naše odborné časopisy, zvětšil se počet stoupenců Hi-Fi techniky a současně se i podstatně zlepšila informovanost a zvětšily se i nároky na jakost reprodukcí.

Ve snaze poskytnout pomoc zájemcům o stavbu jakostního Hi-Fi zařízení byl vyvinut stereofonní zesilovač s křemíkovými tranzistory, který uspokojí i velmi náročné zájemce o jakostní reprodukci. Zesilovač je řešen jako stavebnice, která se může podle potřeby a různých požadavků složit v různém prostorovém uspořádání. Všechny součástky jsou až na malé výjimky umístěny na deskách s plošnými spoji, k jejichž propojení je třeba minimální množství spojů. K osazení zesilovače byly použity zásadně pouze tuzemské součástky. Zesilovač je osazen epitaxně planárními tranzistory (celkem 43 kusů), jedním tyristorem a jedenácti diodami. Obvody jsou navrženy tak, aby se daly použít součástky s běžnými tolerancemi, které jsou dostupné v radioamatérských prodejnách. K oživení a nastavení zesilovače se vystačí s minimálním počtem přístrojů.

Zesilovač se skládá z několika základních částí, které si dále podrobně popíšeme. Pro jednoduchost budeme vždy popisovat činnost a zapojení pouze jednoho kanálu, neboť druhý kanál je zapojen shodně.

Technické parametry stereofonního zesilovače S 2×50 W

Maximální sinusový výkon na zátěži 5 Ω: 50 W pro každý kanál.

Vstupy: mikrofon (2 vstupy)
1,5 mV/47 kΩ; 0,5 mV/47 kΩ,
magnetofonová hlava
2 mV/100 kΩ,
magnetická přenoska
3 mV/47 kΩ,
krystalová přenoska
250 mV/2,2 MΩ,
tuner vysoká úroveň
0,5 V/47 kΩ,
nízká úroveň
150 mV/150 kΩ.

Harmonické zkreslení:

<0,5 % (typicky < 0,2 %).

Intermodulační zkreslení:

<1 % (typicky < 0,5 %).

Kmitočtová charakteristika:

20 Hz až 18 kHz, ±1,5 dB,
10 Hz až 20 kHz, ±3 dB.

Odstup cizích napětí pro plný výkon:

magnetická přenoska > 65 dB,
mikrofon > 70 dB,
ostatní vstupy > 80 dB.

Oddělení kanálů: > 60 dB při 1 kHz.

Regulace basů: ±13 dB na 50 Hz.

Regulace výšek: ±16 dB na 10 kHz.

Filtry šumu: 4 kHz, —3 dB;
10 kHz, —3 dB.

Filtr hluku: 110 Hz, —3 dB.

Regulace souměrnosti kanálů: 1 : 4.

Předzesilovač

Předzesilovač s přepínatelnou korekční zpětnou vazbou je na obr. 36. Má vstupy pro mikrofon, magnetofonovou hlavu, dynamickou přenosku, krystalovou přenosku a pro tuner (řídící přijímač). Pro přizpůsobení impedanční a signálové úrovně jsou vstupy opatřeny vhodnými odporovými děliči. Aby nedocházelo při přepínání vstupů k nežádoucímu klapnutí v reprodukci, jsou vazební kondenzátory C_5 a C_{10} vázány stejnosměrně se zemí zesilovače přes odpory R_{27} a R_9 . Pro zlepšení kmitočtové stability předzesilovače je v sérii se vstupem zapojen malý

odpor R_{28} . Vlastní předzesilovač tvoří tranzistory T_1 , T_2 a T_3 . Tranzistory T_1 a T_2 zajišťují vhodné zesílení signálu. Pro dobrou teplotní stabilitu a nastavení pracovního bodu tranzistorů je zavedena stejnosměrná vazba z emitoru druhého tranzistoru do báze prvního tranzistoru. Vazba se zavádí přes odpory R_{29} , R_{31} , R_{32} a R_{33} . K oddělení střídavého signálu je zpětnovazební větev blokována kondenzátorem C_6 . Touto zpětnou vazbou se nastaví správné pracovní poměry předzesilovače i při velkém rozptýlu stejnosměrného proudového zesilovacího činitele použitých tranzistorů (např. 1 : 10). Přesně lze obvod nastavit výběrem odporu R_{32} .

Kmitočtová závislost napětového zesílení předzesilovače se upravuje v jednotlivých větvích střídavé zpětné vazby, která se zavádí z emitoru tranzistoru T_3 do emitoru tranzistoru T_1 . V případě, že by při ožiování zesilovače došlo ke kmitočtové nestabilitě, je účinným prostředkem zapojení kondenzátoru s malou kapacitou (asi 27 až 39 pF) mezi kolektor a bázi tranzistoru T_2 . Touto úpravou se omezuje zesílení zesilovače na vyšších kmitočtech (nad 20 kHz).

Aby byl vlastní šum zesilovače co nejmenší, má tranzistor T_1 takové pracovní podmínky, aby jím tekla co nejmenší kolektorový proud. Šum tohoto tranzistoru se totiž přičítá k užitečnému signálu a rozhodujícím způsobem ovlivňuje výsledný šum zesilovače. Při menších kolektorových proudech se však zmenšuje proudový zesilovací činitel tranzistoru. Proto je vstup osazen tranzistorem KC509, který má velmi malý vlastní šum a dostatečné proudové zesílení i při malých kolektorových proudech. Při zvolených pracovních poměrech má vstupní tranzistor T_1 kolektorový proud asi 45 μ A. Přestože druhý a současně i třetí tranzistor přispívají k šumu již méně, jsou i v tomto případě použity tranzistory KC509. V případě nedostatku tranzistorů KC509 lze (bez podstatného zhoršení šumových vlastností zesilovače) použít i tranzistory typu KC508. Kolektorový proud tranzistoru T_2 je nastaven asi na 0,5 mA a tranzistoru T_3 asi na 0,8 mA. Typická velikost napájecího napětí pro

mikrofon
15 mV/47 k Ω

magnetofon
2 mV/100 k Ω

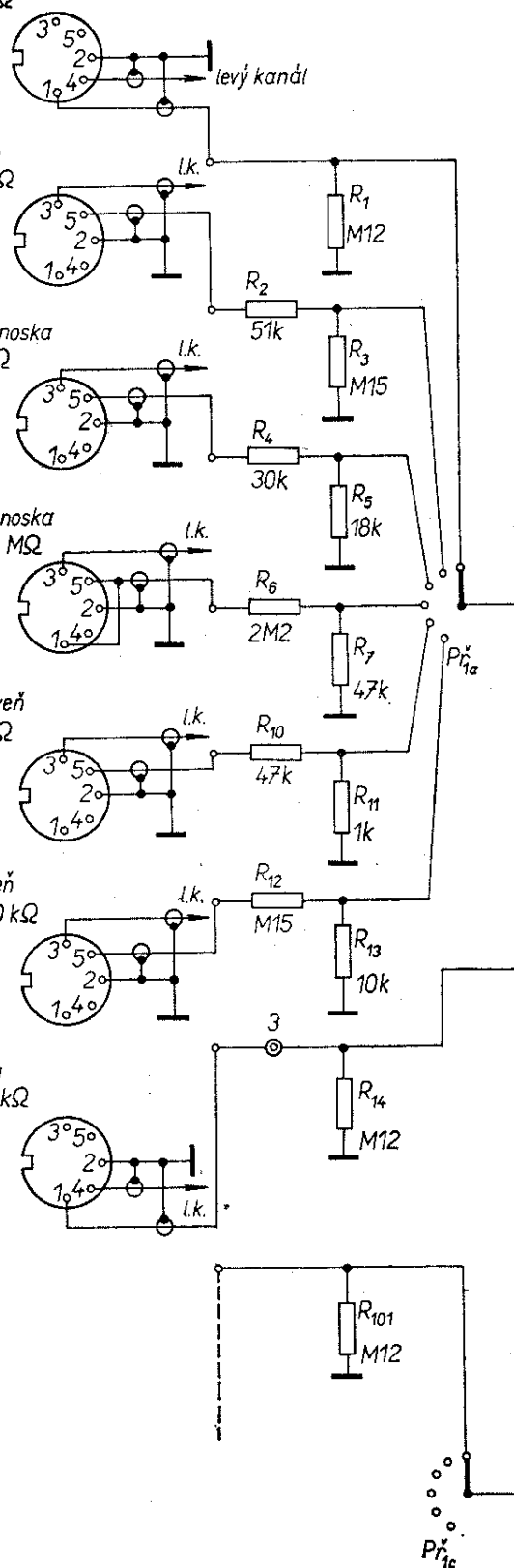
magnet.přenoska
3 mV/47 k Ω

krystal.přenoska
250 mV/22 M Ω

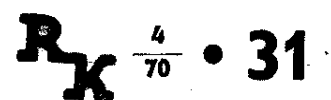
tuner
vysoká úroveň
0,5 V/47 k Ω

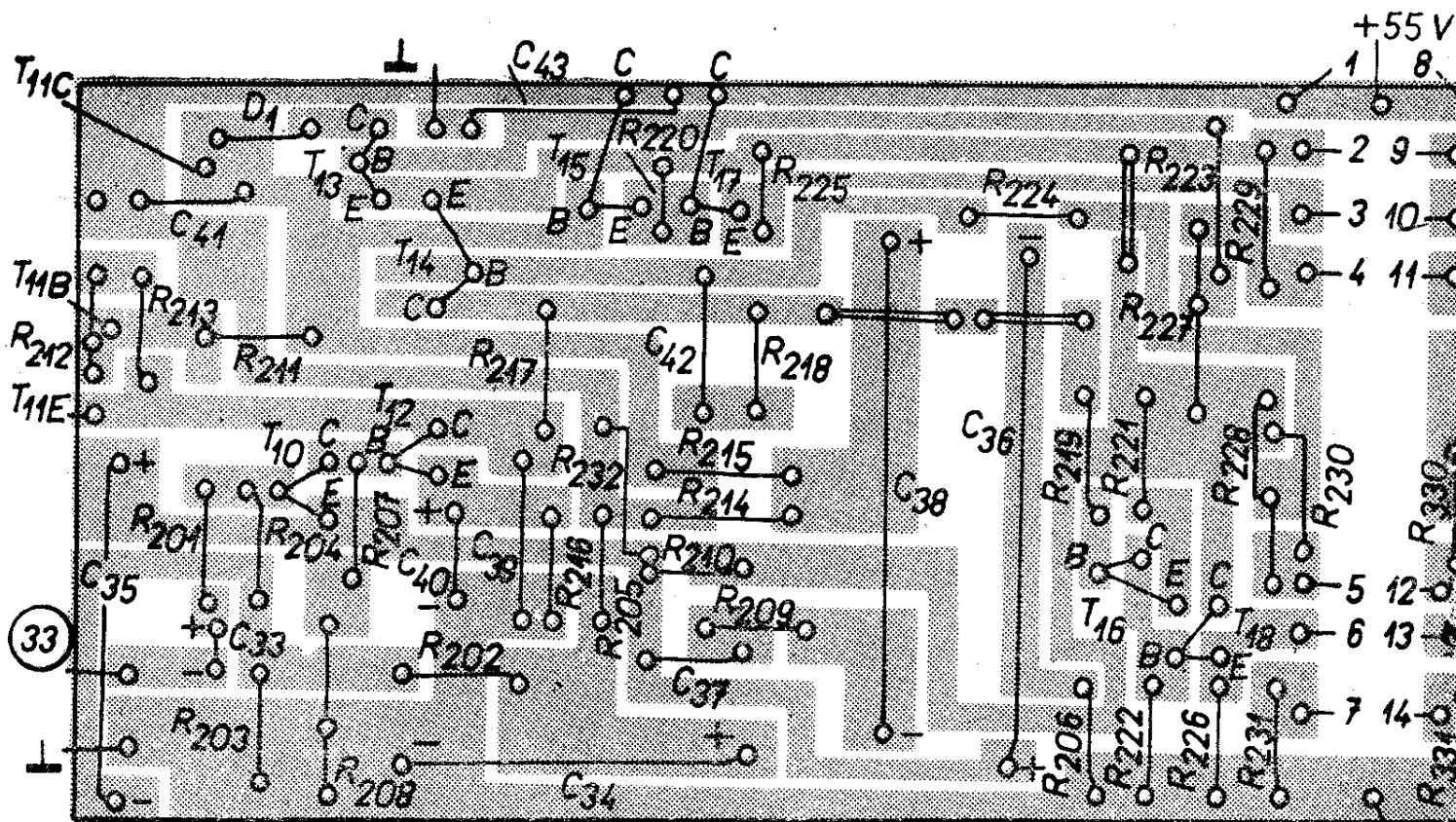
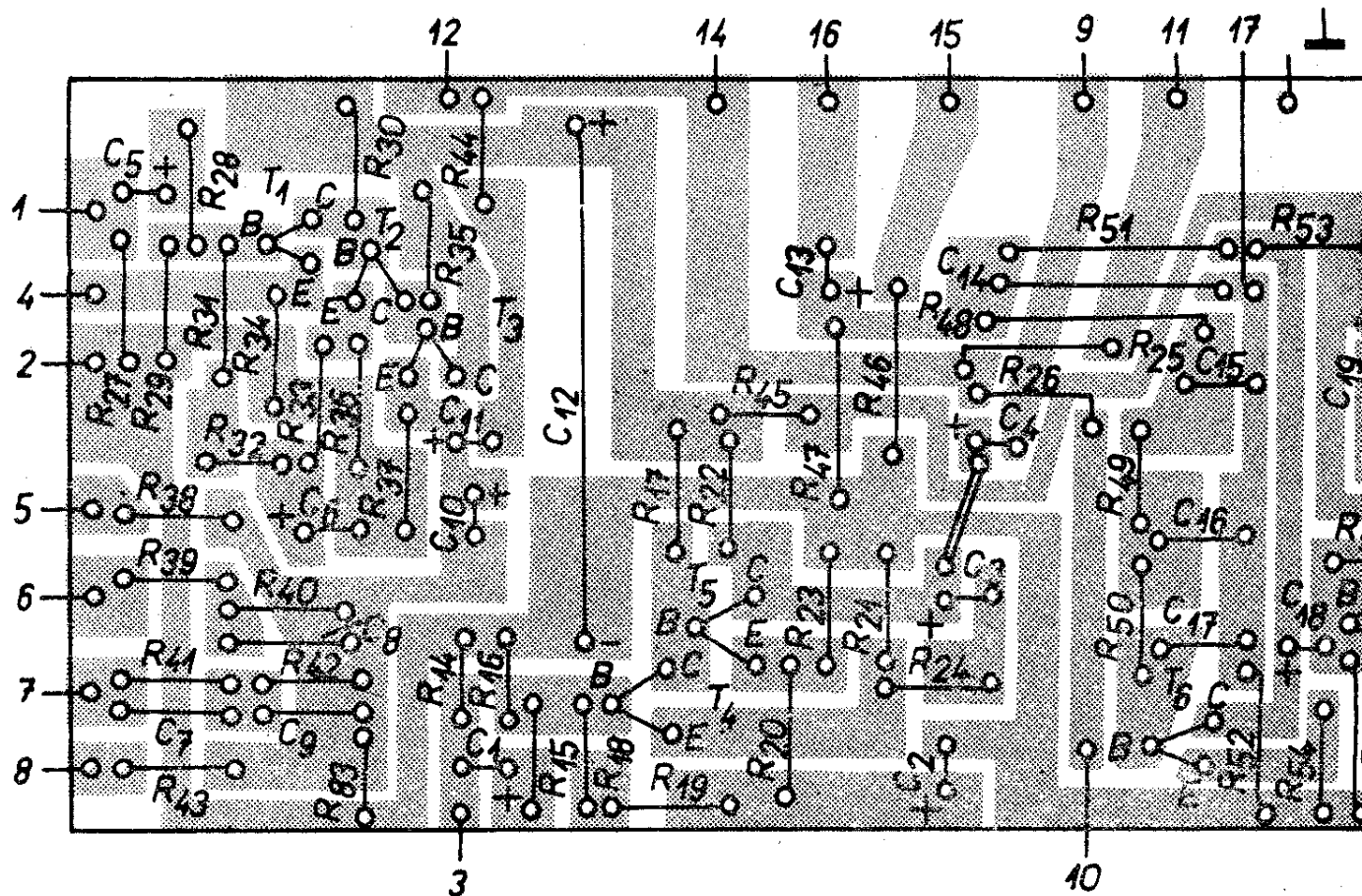
tuner
nízká úroveň
150 mV/150 k Ω

2. mikrofon
0,5 mV/47 k Ω



Obr. 36. Zapojení předzesilovače s korekční zpětnou vazbou pro mikrofon, magnetofonovou hlavu, magnetickou přenosku a pro tuner



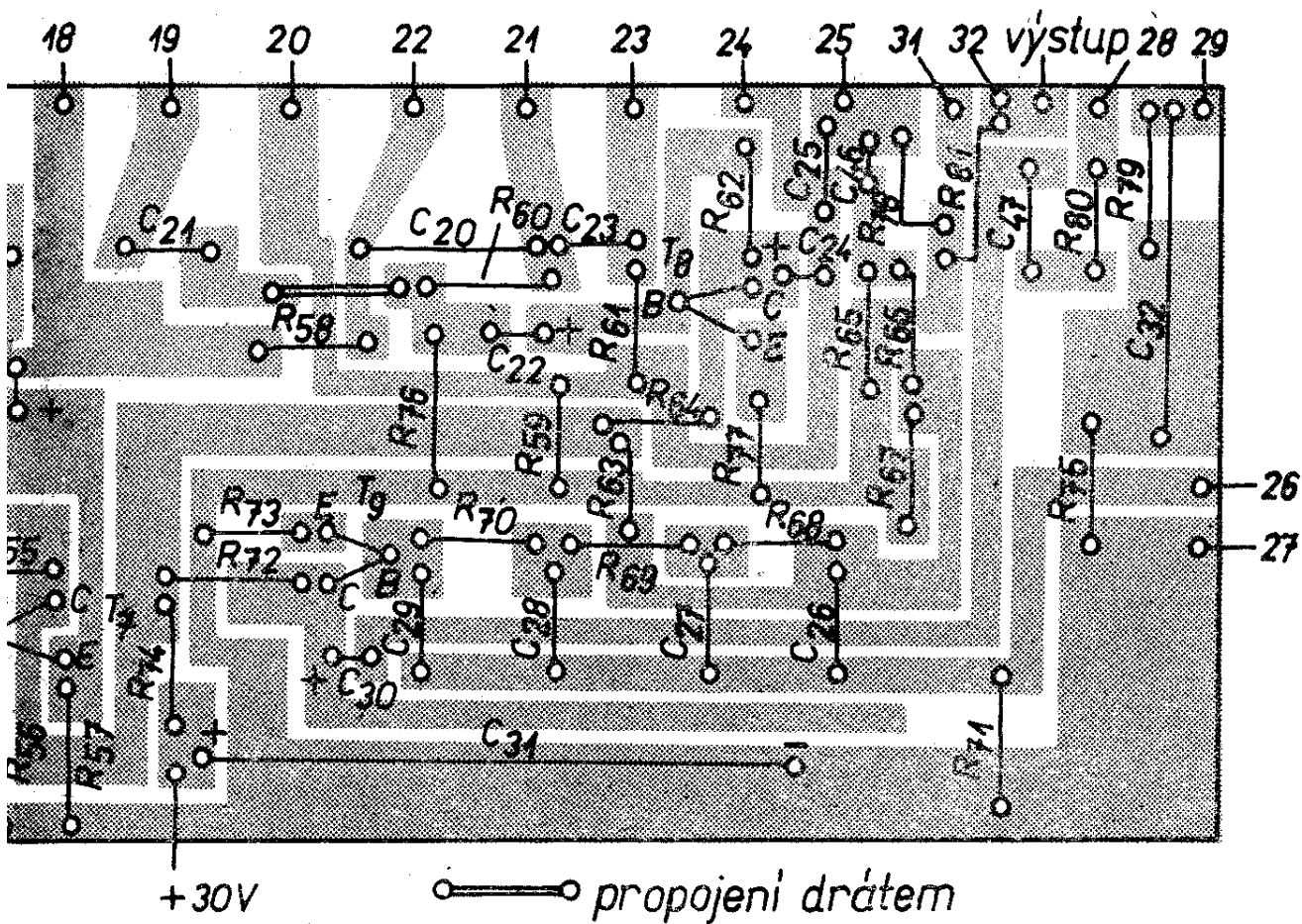


- 1) T19C
- 2) výstup (34)
- 3) T19B

- 4) T19E
- 5) T20C
- 6) T20B

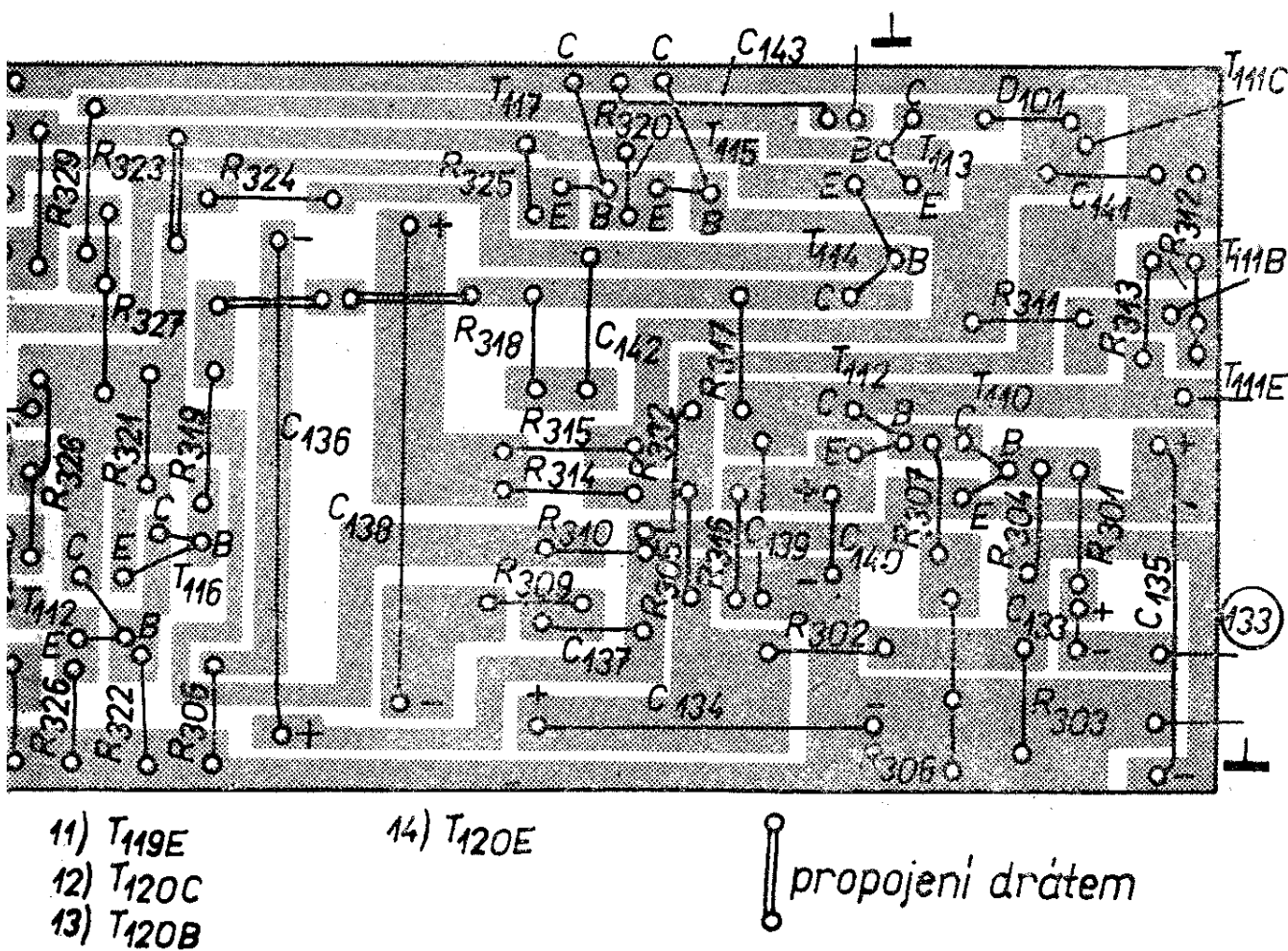
- 7) T20E

- 8) T119C
- 9) výstup (134)
- 10) T119B



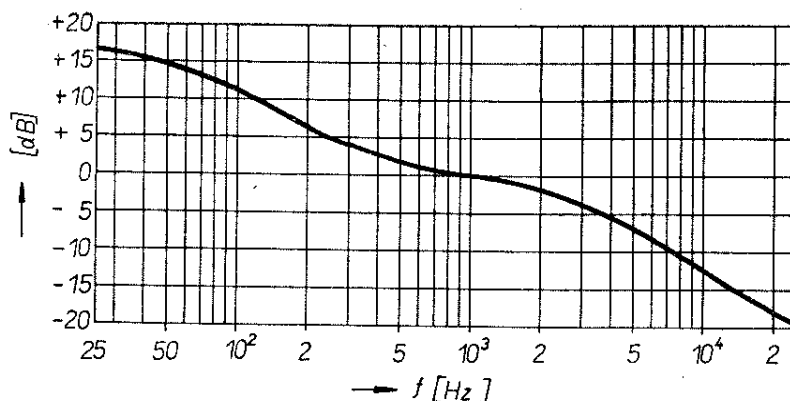
Obr. 47. Deska s plošnými spoji předzesilovače a rekčního zesilovače Smaragd D60

$R_{63} = R_9$; levý vývod kondenzátoru C_{31} má být správně zapojen o 7 mm dále vlevo)



Obr. 49. Deska s plošnými spoji obou kanálů koncového zesilovače Smaragd D61

Obr. 37. Amplitudová charakteristika napětového přenosu předzesilovače pro magnetickou přenosku



předzesilovač je 17,5 V. Toto napětí se získává po filtraci kondenzátorem C_{13} na odporu R_{45} z napájecího napětí 20 V.

Z výstupu předzesilovače jsou přes kondenzátor C_{10} zavedeny přepínatelné střídavé záporné zpětné vazby. Jsou to střídavé zpětné vazby, které upravují zesílení předzesilovače pro předpokládané úrovně signálů z lineárních zdrojů signálu, tj. z mikrofonu a tuneru. Také pro připojení krystalové přenosky se používá lineární zpětná vazba. Vstup pro připojení krystalové přenosky má velkou vstupní impedanci (dělič z odporů R_6 a R_7), neboť krystalová přenoska pracuje naprázdno jako výchylková – zvolený způsob konstrukce vstupu se ukázal jako nejvýhodnější z hlediska potlačení brumu. Pokud by vlivem vstupní kapacity předzesilovače docházelo k poklesu vysokých kmitočtů v reprodukci, lze připojit kondenzátor s malou kapacitou C_p paralelně k odporu R_6 . Kapacita tohoto kondenzátoru se volí tak, aby byl splněn vztah

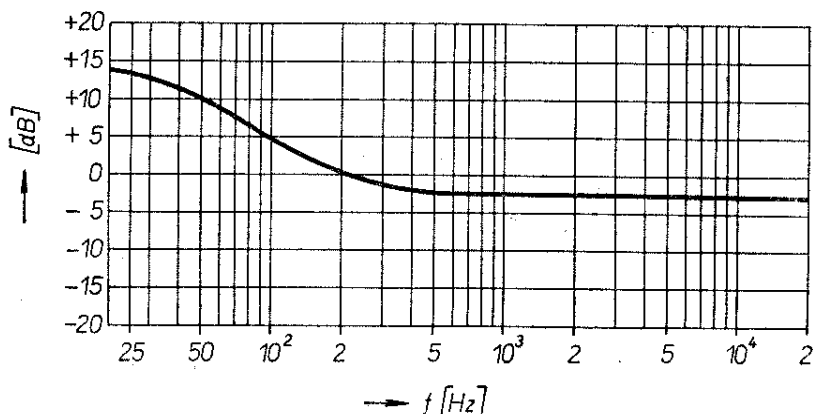
$$R_6 C_p = R_7 C_v.$$

To, že se při tomto uspořádání vstupu nepotlačuje vlastní šum předzesilovače,

nemusí být na závadu, použije-li se jako T_1 tranzistor typu KC509, vybraný popř. s ohledem na co nejmenší šum.

K úpravě signálu z magnetické přenosky se používá kmitočtově závislá zpětná záporná vazba, tvořená členem RC (R_{41} , R_{42} , C_7 , C_9). Tento člen má tři různé časové konstanty, 3180 μ s, 318 μ s a 78 μ s, jak to odpovídá předpisu normy R.I.A.A. Obdobnou kmitočtově závislou zápornou zpětnou vazbu má i vstup pro magnetofonovou hlavu (odpory R_{39} , R_{40} a kondenzátor C_8). Zpětnovazební člen RC je v tomto případě navržen pro posuv pásku 9,47 cm/s (tzv. rychlost 9), v souladu s normou R.I.A.A. K tomu, aby byly odchylky od požadovaných kmitočtových průběhů zesílení předzesilovače maximálně ± 1 dB, je třeba vybrat prvky zpětnovazebních článků s tolerancí maximálně 5 %. Napětový přenos předzesilovače (vzhledem k 1 kHz) je pro magnetickou přenosku na obr. 37 a pro magnetofonovou hlavu na obr. 38.

Připojíme-li přepínačem funkcí k předzesilovači mikrofonní vstup, je zesílení přepínatelného předzesilovače (ze vstupu do emitoru tranzistoru T_3) asi 100. Předzesilovač má velmi malé zkreslení



Obr. 38. Amplitudová charakteristika napětového přenosu předzesilovače pro magnetofonovou hlavu

a zpracuje i více jak třicetinasobek jmenovitého vstupního napětí. Maximální efektivní napětí, které je zesilovač schopen zpracovat bez zkreslení, je 4,5 V.

Každý kanál předzesilovače obsahuje ještě samostatný lineární předzesilovač, který má vstup pro mikrofon. Napěťové zesílení tohoto zesilovače je asi 200, aby bylo možné připojit k zesilovači i mikrofony s menší úrovní výstupního napětí (0,2 mV až 0,5 mV). Výstupy obou předzesilovačů jsou vzájemně propojeny, takže lze v případě potřeby míchat signál z mikrofону se signály z jiných zdrojů. Z výstupu předzesilovače je signál vyveden tak, aby bylo možno zesílený signál nahrávat na magnetofon (vstup pro připojení přijímače). Případně lze na stejný konektor přivádět signál z magnetofonu s možností korekce výšek a hloubek v korekčním zesilovači.

Vyvážení kanálů, stereováha

Na výstup předzesilovače je připojen potenciometr stereováhy a přepínač mono-stereo. K vyvažování kanálů se používá tandemový potenciometr s lineárním průběhem. Potenciometrem lze regulovat zesílení v poměru 1 : 4, což plně vyhovuje i pro vyrovnání zesílení kanálů v prostoru, kde posluchači nejsou nebo nemohou být přesně ve středu reproduktorových soustav.

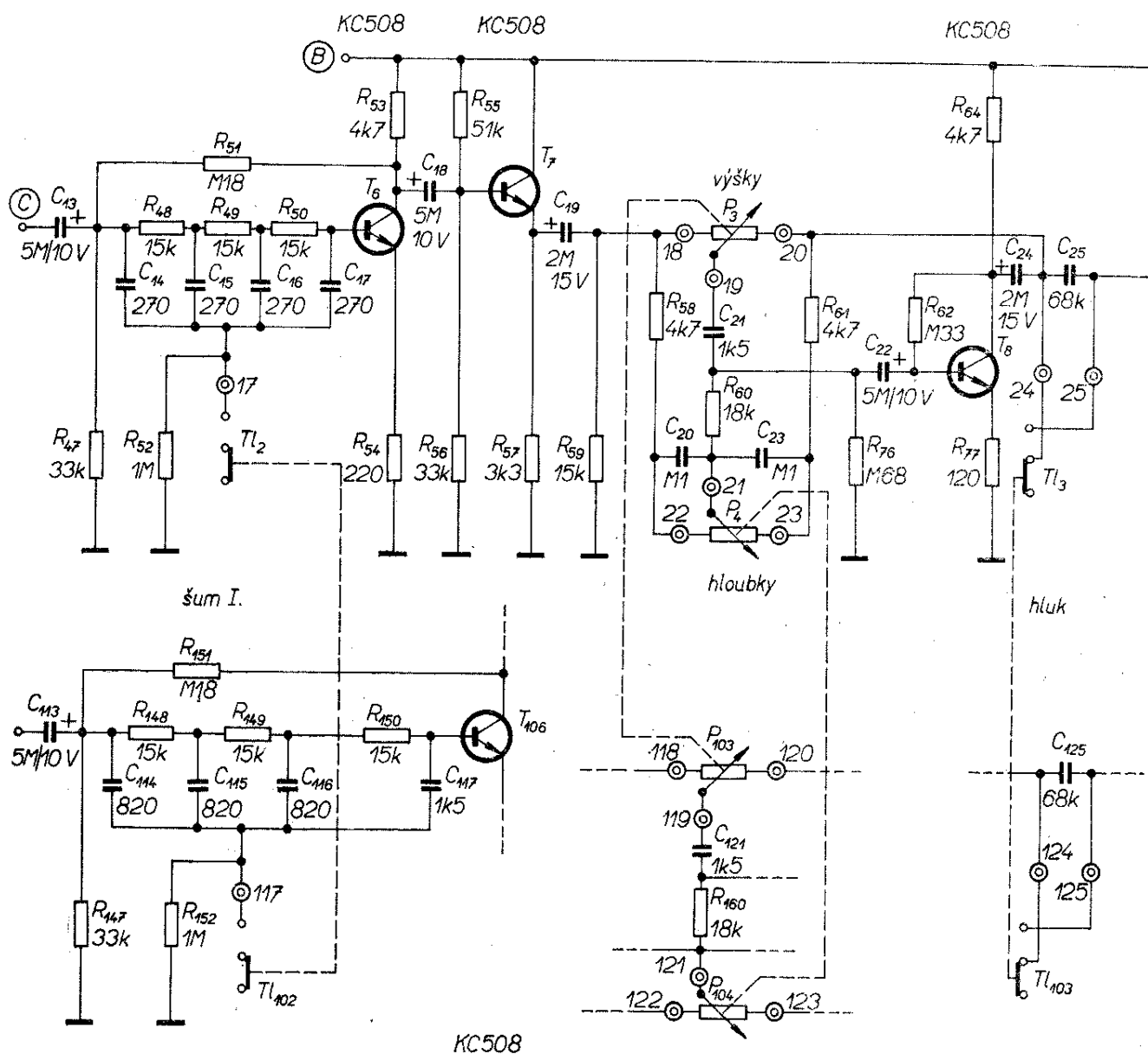
Filtry a korekční zesilovač

Za předzesilovačem jsou zařazeny obvody pro úpravu kmitočtového spektra zesilovaného signálu (obr. 39). Ve stupni s tranzistorem T_6 je zařazen vypínatelný filtr šumu, řešený jako trojitý integrační člen RC. Filtr odřezává kmitočty nad 10 kHz. K nastavení pracovního bodu tranzistoru T_6 se používá záporná zpětná vazba z kolektoru do báze. Ta spolu s dostatečně velkým neblokováným emitorovým odporem R_{54} dovoluje použít v tomto stupni tranzistory s velkým rozptylem stejnosměrného zesilovacího činitele, aniž by došlo k závažnější odchylce od optimální polohy pracovního

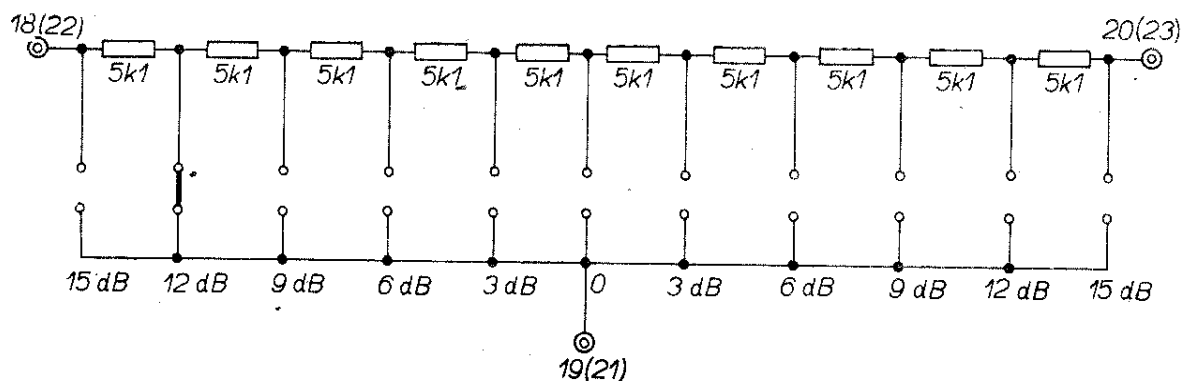
bodu. K oddělení stupně s tranzistorem T_6 od zpětnovazebního korektoru se používá emitorový sledovač s tranzistorem T_7 . Celkové napěťové zesílení z báze tranzistoru T_6 do emitoru T_7 je asi 16.

Zpětnovazební korektor je Baxandallůva typu. Vzhledem k nedostupnosti jakostních tandemových potenciometrů je tandemový potenciometr nahrazen upraveným dvacetičtyřpolohovým radičem. Radič je upraven tak, že se používá jako přepínač s 2×11 polohami. Mezi desky přepínače je připájeno dvakrát deset odporů 5,1 k Ω , vybraných s přesností $\pm 5\%$ nebo lepší. Hodnoty součástek regulátorů jsou voleny tak, aby se regulátory vzájemně neovlivňovaly. Další výhodnou vlastností tohoto korektoru je, že v jakékoli poloze regulátorů nedochází k významnějšímu ovlivňování kmitočtu středu pásma kolem 1 000 Hz. Náhrada potenciometru radičem je zřejmá z obr. 40. S ohledem na použití radičů je ovšem třeba doplnit obvod korektoru odpory (mezi vstup, výstup a zem), které spojují stejnosměrně jeden pól oddělovacích kondenzátorů se zemí; tím se odstraní nepříjemné klapání v reprodukci při přepínání radičů korektoru.

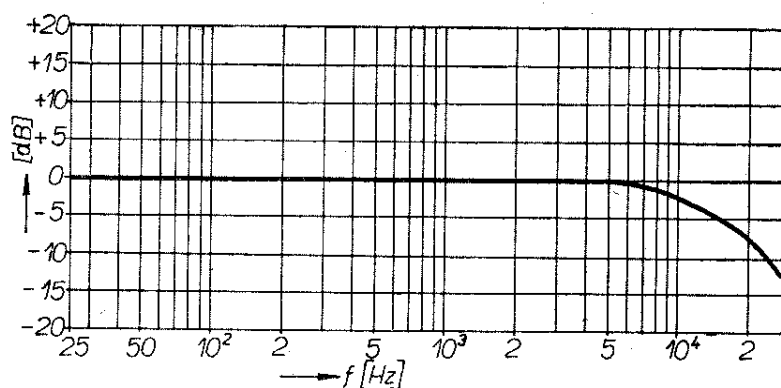
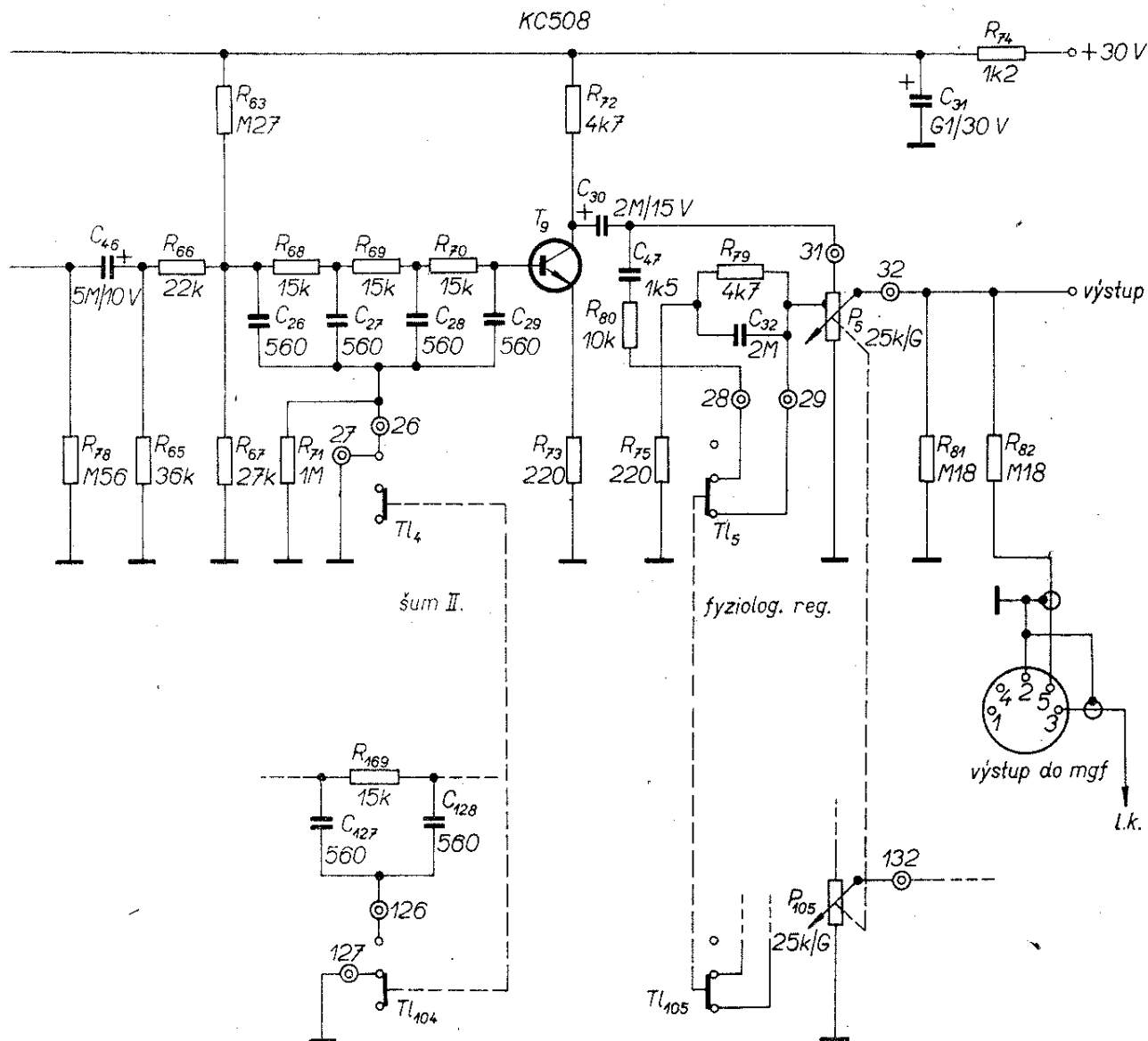
Baxandallův korektor je zapojen ve zpětné vazbě tranzistoru T_8 . Také tento stupeň je zapojen tak, aby se vyloučil vliv rozptylu proudového zesilovacího činitele tranzistoru (záporná zpětná vazba z kolektoru do báze a velký neblokováný emitorový odpor u T_8). Tím se současně zajistila velká odolnost proti zkreslení a velký vstupní odpor stupně. Při ožívání zesilovače může dojít vlivem nevhodného uspořádání spojů a jednotlivých dílů zesilovače k parazitním oscilacím. Jedním z účinných prostředků proti rozkmitání je vložení malého odporu (řádů stovek Ω nebo několika k Ω) mezi vstup stupně s tranzistorem T_8 a výstup korektoru. Ve schématu na obr. 39 není tento odpor zakreslen, protože se uvedený jev u zesilovače při zvoleném uspořádání spojů neprojevil. Za stupněm s tranzistorem T_8 je vložen vypínatelný filtr, který potlačuje brum (dunění) pod kmitočtem 100 Hz. Strmost filtru je 20 dB/okt. Aby nedocházelo k nepříjemnému lupnutí při vypínání tohoto filtru, je vazební elektro-



Obr. 39. Zapojení filtrů a korekčního zesilovače



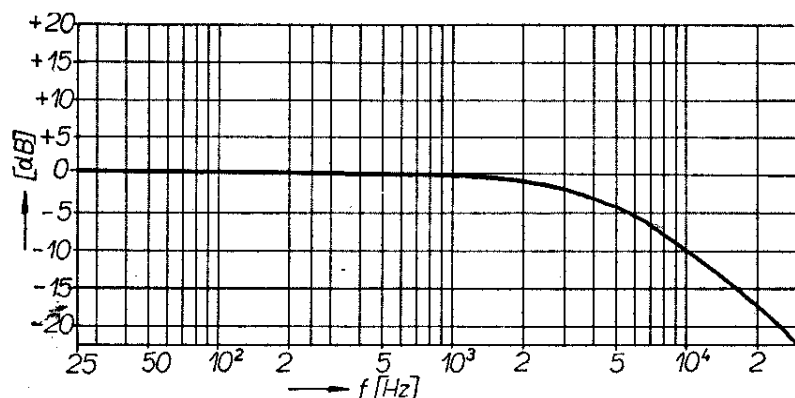
Obr. 40. Zapojení řadiče regulátoru výšek a hloubek



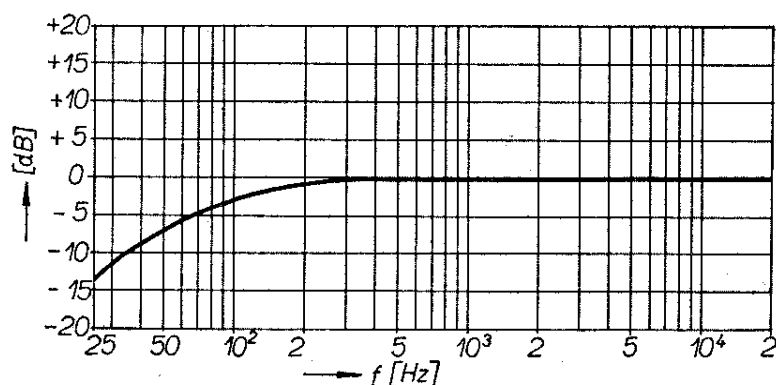
Obr. 41. Útlumová charakteristika prvního filtru šumu

lytický kondenzátor C_{46} stejnosměrně vázán přes odpor R_{78} se zemí. Ke kondenzátoru C_{24} není třeba připojovat vazební odpor na zem, neboť tento kondenzátor je záporným pólem stejnosměrně připojen

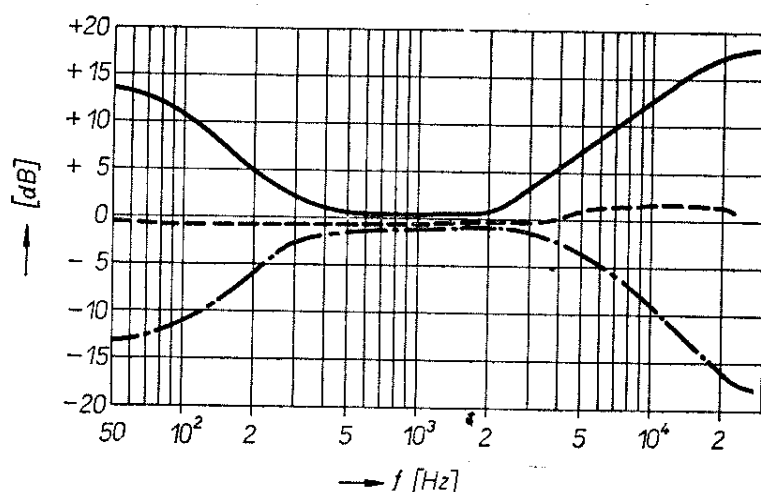
na zem přes řadič k regulaci výšek a odpor R_{59} . Útlumové vlastnosti filtrů jsou na obr. 41 až 43. Amplitudové charakteristiky napětového přenosu korektorů jsou na obr. 44.



Obr. 42. Útlumová charakteristika druhého filtru šumu



Obr. 43. Útlumová charakteristika filtru proti dunění (brumu)



Obr. 44. Napěťový přenos zpětnovazebního korektoru

Za filtrem brumu následuje druhý filtr šumu, který odřezává kmitočty nad 4 000 Hz. Tento filtr je opět tvořen čtyřstupňovým integračním členem RC. Aby při zapínání filtru nedocházelo k nežádoucímu lupnutí, jsou filtrační kondenzátory trvale připojeny přes odpor R_{71} na zem; odpor se při zapnutí filtru zkratuje. Činnost tohoto filtru je podobná činnosti prvního šumového filtru.

Korekční zesilovač je ukončen zesilovacím stupněm s tranzistorem T_9 , jímž se vyrovnávají ztráty v napěťovém přenosu na druhém šumovém filtru. Tento zesilo-

vací stupeň, vzhledem k jeho umístění těsně před regulátorem hlasitosti, je řešen pro velký budicí signál. Napěťové zesílení stupně s T_9 je asi 25 (z báze do kolektoru). Stupeň může odevzdat maximální efektivní napětí (na kolektoru T_9) 5,5 V. Stupeň je teplotně stabilizován a jeho pracovní bod je nastaven odporovým děličem v bázi a neblokovaným odporem v emitoru T_9 . Tím, že je potřebné předpětí tranzistoru nastaveno děličem připojeným mezi kladný pól napájecího napětí a zem, má tento stupeň vzhledem k ostatním stupňům větší napěťové zesí-

lení. Napěťové zesílení je při dostatečně velkém proudovém zesilovacím činiteli tranzistoru T_9 (kolem 100) určeno přibližně poměrem výsledného zatěžovacího odporu v kolektoru a neblokovaného emitorového odporu. Vzhledem k tomu, že je žádoucí využít u tohoto stupně pro rozkmit výstupního napětí celého napájecího napětí, je vhodné kontrolovat, zda je nastavena doporučená úroveň stejnosměrného napětí na kolektoru T_9 . V případě, že uvedený údaj (tab. 2) nesouhlasí se skutečností, lze požadovaného stavu dosáhnout výběrem tranzistoru nebo úpravou odporu R_{63} . Stejně jako tranzistor T_6 má i tranzistor T_9 v emitoru neblokovaný odpor 220Ω , tím je zajištěn dostatečně velký vstupní odpor, aby filtry šumu málo zatěžovaly předchozí obvody.

Tab. 2. Stejnosměrná napětí na elektrodách tranzistorů předzesilovače a korekčního zesilovače při napájecím napětí 35 V

Tranzistor	U_B [V]	U_C [V]	U_E [V]
T_1	0,55	1,75	—
T_2	1,75	10	1,2
T_3	9,6	17,5	10
T_4	0,55	1,75	—
T_5	1,75	10	1
T_6	1	9,2	0,5
T_7	7,4	20	7
T_8	1	4,8	0,4
T_9	0,85	10,3	0,45

Poznámka. Napětí jsou měřena Avometem II na příslušném nejmenším napěťovém rozsahu (proti zemi zesilovače).

Regulátor hlasitosti

Pro regulátor hlasitosti nelze použít tandemový potenciometr, neboť na trhu není žádný vhodný typ s dostatečně přesným souběhem. Proto bylo zvoleno řešení s řadičem se dvacetičtyřmi polohami. Po zkušenostech se stupňovitým regulátorem použitým ve stavebním návodu na Transiwatt bylo zvoleno logaritmické rozložení odporů na řadiči.

Konstrukce stupňovitého regulátoru a doporučené odpory byly publikovány v HaZ, č. 9/67. Proti původnímu návrhu je však změna v korekčním obvodu pro fyziologickou regulaci hlasitosti. Odbočka pro kmitočtově závislé členy R_{75} , R_{79} , C_{32} a R_{80} , C_{47} byla zvolena mezi odpory řadiče 470Ω a 270Ω . Členy R_{75} , R_{79} , C_{32} slouží ke zdůraznění výšek, členy R_{80} , C_{47} zdůrazňují hloubky (obr. 39). Je-li běžec řadiče pod odbočkou, zmenšuje se vlivem uvedených členů RC útlum regulátoru pro vysoké a nízké kmitočty, zatímco na kmitočtech kolem 1 000 Hz zůstává stálý. Zdůraznění okrajů pásma je tím patrnější, čím je běžec řadiče níže pod odbočkou. Tím se kompenzuje pokles vnímavosti lidského ucha na okrajové kmitočty při malých hlasitostech reprodukce (viz Fletcher-Munsonovy křivky na obr. 9 v první části tohoto čísla RK). Fyziologická korekce se může vypnout tlačítkem (zůstává zdůraznění hloubek). Je-li běžec řadiče nad odbočkou, vliv korekčních členů se neuplatní a na běžci regulátoru je signál lineární (bez úpravy). Celkový odpor regulátoru je $27 \text{ k}\Omega$. Zapojení regulátoru hlasitosti je na obr. 45.

Aby nebyl porušen logaritmický průběh regulace, musí být vstupní odpor koncového zesilovače co největší. Tím, že je regulátor připojen k zatěžovacímu odporu R_{72} , $4,7 \text{ k}\Omega$, tranzistoru T_9 , je splněna i podmínka napájení vstupu regulátoru ze zdroje s malou impedancí. Aby při přepnutí regulátoru nedocházelo k lupnutí, je běžec regulátoru připojen na zem přes odpor R_{81} .

Vzhledem k tomu, že se používá odporový řadič jako regulátor hloubek, výšek i hlasitosti, je třeba zajistit, aby elektrolytické kondenzátory použité jako vazební členy těchto regulátorů měly zanedbatelný svodový proud. Jinak by se při přepínání řadičů ozýval rušivý praskot nebo šum.

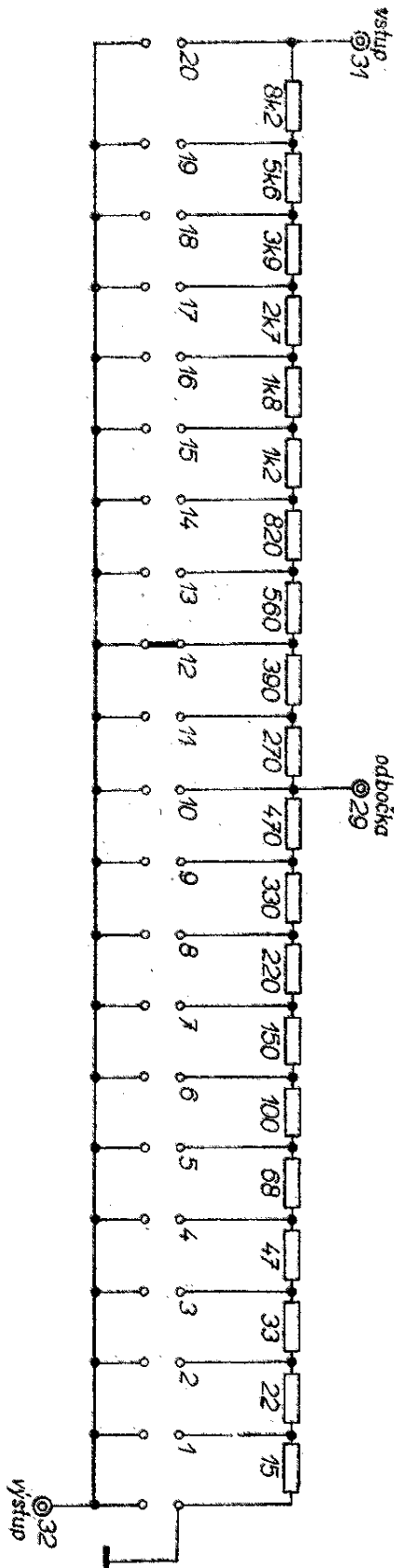
Kontrolní velikosti stejnosměrných napětí na tranzistorech jsou v tab. 2.

Všechny obvody, které jsme doposud popsali, jsou umístěny na jedné společné desce s plošnými spoji o rozměrech $260 \times 70 \text{ mm}$ (obr. 46). Předzesilovač a korekční zesilovač pro druhý kanál jsou na druhé rozměrově stejné desce. (Oba

Výkonový zesilovač

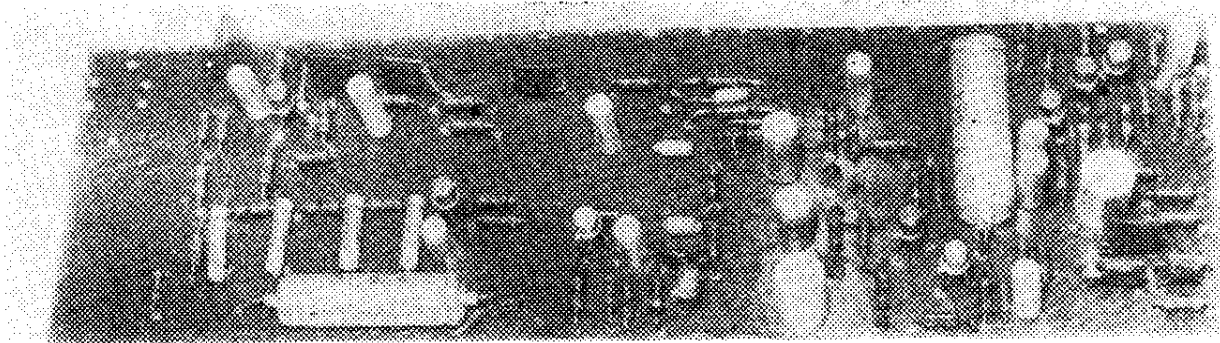
Z regulátoru hlasitosti pokračuje signál na vstup výkonového zesilovače, zapojeného podle obr. 48. Vazební kondenzátor C_{33} musí mít zanedbatelný svodový proud. Odpor R_{201} slouží jako ochrana proti vysokofrekvenčním oscilacím křemíkových tranzistorů koncového zesilovače. Vzhledem k velkému vstupnímu odporu koncového výkonového zesilovače (asi 50 k Ω) lze bez nebezpečí vzniku oscilací tento odpor ještě zvětšit až asi na 10 k Ω . Vstupní obvod výkonového zesilovače je osazen tranzistorem T_{10} . Tranzistor má vodivost typu p-n-p, takže lze na něj navázat přímo další tranzistor T_{12} . K dosažení velkého vstupního odporu se používá střídavá zpětná vazba z emitoru tranzistoru přes kondenzátor C_{35} . Toto zapojení, zvané „bootstrap“, je velmi oblíbené u profesionálních zesilovačů. Vlivem této vazby jsou odpory R_{202} a R_{203} připojeny paralelně k emitorovému odporu. Odpor R_{204} je připojen paralelně k odporu přechodu emitor-báze a vzhledem k jeho velikosti zmenšuje ho nepatrně. Odpory R_{202} a R_{203} jsou také podstatně větší než emitorový odpor R_{206} . Výsledný vstupní odpor je proto přibližně určen součinem stejnosměrného proudového zesilovacího činitele a odporu R_{206} . Bootstrapovým zapojením se dosáhne i dobrého kmitočtového průběhu.

Na kolektor tranzistoru T_{10} je přímo vázán tranzistor T_{12} s vodivostí typu n-p-n. Tento tranzistor má jako zátěž odpor R_{214} a tranzistor T_{11} . Tranzistor T_{11} se používá k získání předpětí, jímž se nastavuje pracovní bod dvojčinného kvazikomplementárního koncového zesilovače do třídy B. Odporovým trimrem R_{212} se nastavuje pracovní režim tranzistoru T_{11} , tranzistor slouží i k teplotní stabilizaci koncového zesilovače. Proto je třeba tento tranzistor umístit přímo na chladič do blízkosti koncových výkonových tranzistorů. Nejlepším způsobem je uložení tranzistoru T_{11} do otvoru, který je vyvrtán přímo v chladiči, aby byl zajištěn dobrý tepelný kontakt tranzistoru T_{11} s chladičem a přitom aby tranzistor T_{11} byl elektricky od chladiče izolován. Výhodné je použít jako izolaci epoxidovou prysky-



Obr. 45. Zapojení řízení regulátoru hlasitosti

kanály výkonového zesilovače jsou však na jedné společné desce s rozměry desky předzesilovače). Deska s plošnými spoji je na obr. 47, str. 32 a 33.



Obr. 46. Osazená deska předzesilovače a korekčního zesilovače

řici, do níž jsou přimísena velmi jemná zrnka hliníku nebo duralu.

Zvýší-li se teplota chladiče, tranzistor T_{11} se otvírá a zmenšuje se tak předpětí koncového zesilovače. Tento způsob teplotní stabilizace je účinnější než použití diod nebo termistorů; teplotní změny stabilizačního tranzistoru jsou totiž v těsnějším souběhu s teplotními změnami budičů a koncových tranzistorů. Kondenzátory C_{39} , C_{41} a C_{42} a člen R_{209} , C_{37} korigují fázovou charakteristiku a zabráňují oscilacím.

Vlastní výkonový zesilovač je řešen jako dvojčinný kvazikomplementární zesilovač, pracující ve třídě B. Každá větev zesilovače má tři tranzistory. K získání fázově otočených budičů napětí slouží budič, složený z doplňkových tranzistorů T_{15} a T_{16} . K vyrovnání velikostí střídavého signálu na emitoru tranzistoru T_{15} a kolektoru tranzistoru T_{16} slouží odpory R_{215} , R_{217} , R_{219} , R_{220} , R_{221} a R_{222} . Tím je zabezpečena linearizace napětí při obou polaritách signálu. Odpory R_{217} , R_{219} a R_{215} slouží současně k vyrovnání vstupních odporů obou tranzistorů budiče a tím k potlačení zkreslení. Toto vyrovnání je nastaveno především pro nižší úroveň kolektorových proudů. Zařazení tranzistorů T_{17} a T_{18} před koncové tranzistory je velmi výhodné, neboť se tím odlehčí budič z doplňkových tranzistorů. Výsledné proudové zesílení každé trojice tranzistorů je určeno přibližně součinem stejnosměrných zesilovacích činitelů příslušných tří tranzistorů. K linearizaci převodních charakteristik tranzistorů a tím ke zmenšení zkreslení slouží emitorové odpory R_{225} , R_{226} , R_{229} a R_{231} .

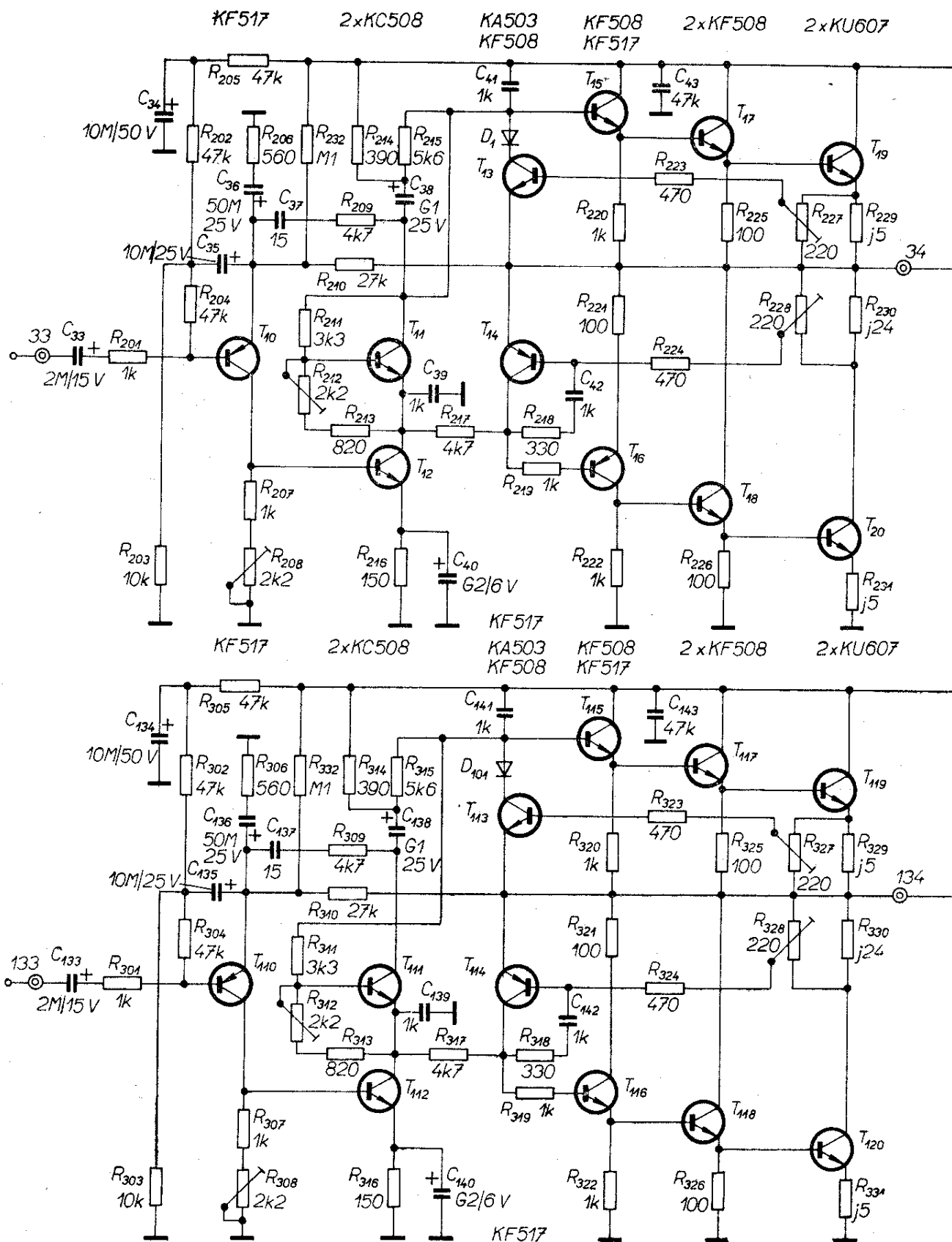
Odpory R_{229} a R_{231} chrání částečně koncový zesilovač proti přetížení.

Zavedením záporné zpětné vazby z výstupu do emitoru tranzistoru T_{10} je celkové napětové zesílení výkonového zesilovače určeno přibližně poměrem odporů R_{210} a R_{206} (přibližně 50). Pro plné vybudování koncového stupně na efektivní napětí 16 V na zátěži 5Ω je třeba vstupní napětí 0,32 V.

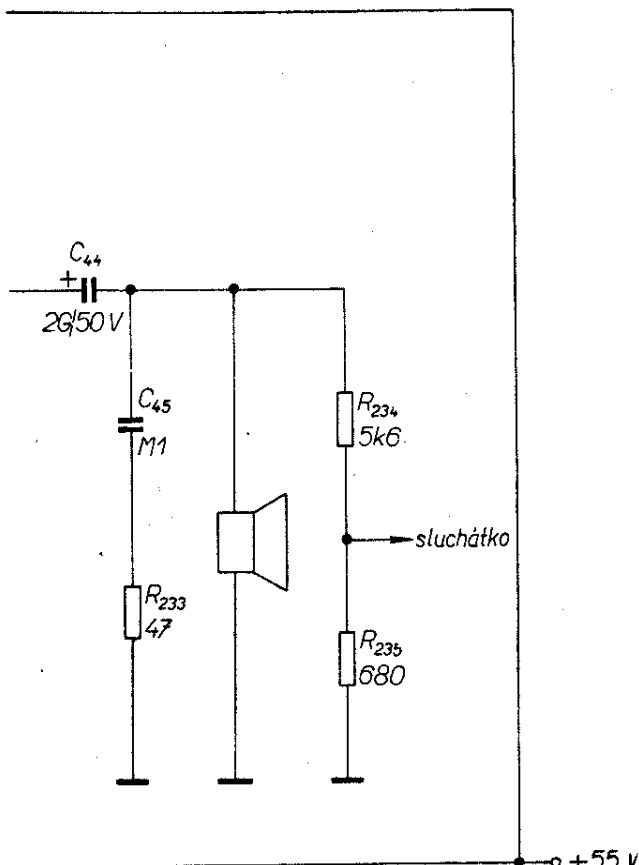
Proti zničení chrání výkonový zesilovač elektronická pojistka, podobná pojistce publikované v popisu zesilovače firmy Fairchild v HaZ. č. 11 a 12/67. Pojistku tvoří tranzistory T_{13} a T_{14} . Tyto tranzistory jsou při běžných provozních podmínkách (pokud výstupní výkon není větší než povolená velikost, nebo nedojde-li ke zkratu výstupu na zem) uzavřeny. Aby nedošlo k opačné polarizaci tranzistoru T_{13} , je v jeho obvodu zapojena dioda D_1 . Člen R_{218} , C_{42} slouží k potlačení oscilací při vybavování pojistky. Při přetížení výkonového zesilovače protéká odpory R_{229} a R_{230} zvětšený emitorový proud tranzistoru T_{19} a kolektorový proud tranzistoru T_{20} . Část napětí, která vzniká na odporech R_{229} a R_{230} se snímá z běžců odporových trimrů R_{227} a R_{228} . Odtud se přivádí přes oddělovací odpory R_{223} a R_{224} na báze tranzistorů T_{13} a T_{14} . Oddělovací odpory zvětšují vstupní odpor pojistky. Při přetížení se napětí na odbočkách trimrů zvětší tak (na 0,6 V), že se začnou otvírat tranzistory T_{13} a T_{14} . Budič napětí se zmenší, tranzistory T_{13} a T_{14} se přivírají. Pojistka nasazuje poměrně rychle a dobře omezuje výstupní proud.

Odporovým trimrem R_{208} se nastavuje napětí mezi odpory R_{229} a R_{230} přibližně

$$R_K \frac{4}{70} \cdot 41$$



Obr. 48. Zapojení koncového zesilovače

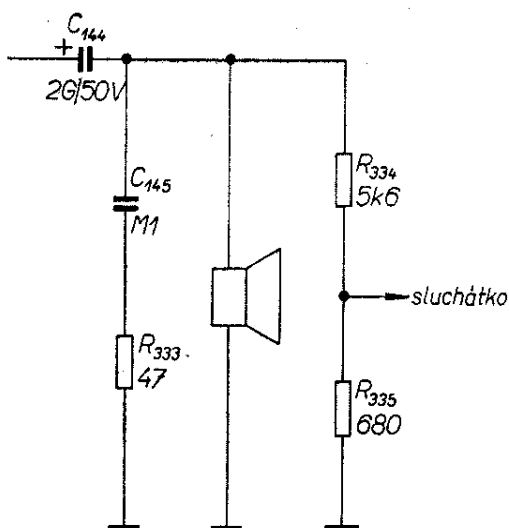


na polovinu napájecího napětí (tj. na 27,5 V). Při těchto pracovních podmínkách se dosáhne největšího rozkmitu výstupního střídavého napětí. Odporovým trimrem R_{212} se nastavuje pracovní bod každého z trojice tranzistorů T_{15} , T_{17} , T_{19} a T_{16} , T_{18} a T_{20} . K dosažení co nejmenšího zkreslení při dobré teplotní stabilitě se doporučuje nastavit klidový proud ze zdroje asi na $40 \text{ mA} \pm 10 \text{ mA}$.

Na výstupu koncového zesilovače je za vazebním kondenzátorem C_{44} připojen Boucherotův člen RC, který potlačuje oscilace v oblasti kmitočtů nad 120 kHz.

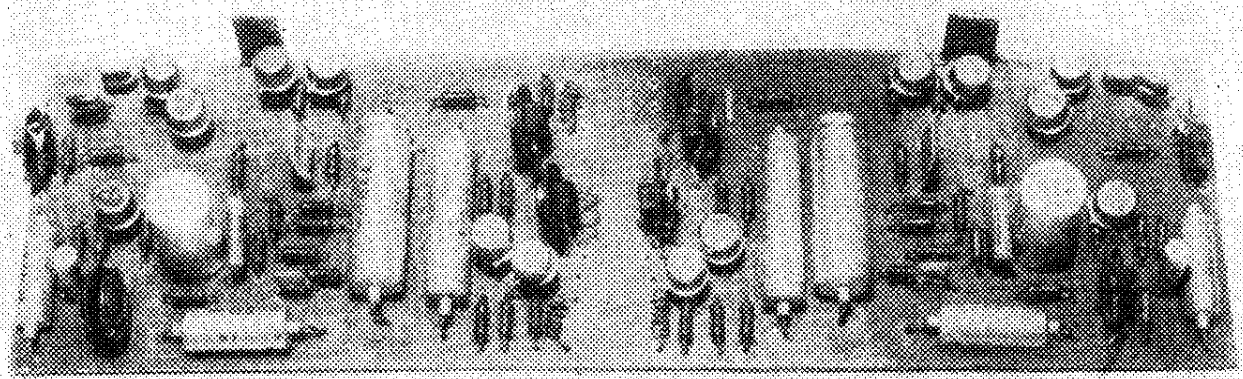
Výstupní signál je veden do konektoru pro připojení reproduktorové soupravy. Doporučuji používat reproduktorovou soupravu s celkovou impedancí 5 Ω ; tak je možno dosáhnout výstupního výkonu 50 W. Je samozřejmě možné zapojit k zesilovači i reproduktorové soupravy s impedancí 4 Ω , popř. s impedancí větší než 5 Ω . Dosažitelný výstupní výkon pak samozřejmě závisí na impedanci použité reproduktorové soustavy. K výstupu je připojen i odporový dělič R_{234} a R_{235} . Mezi střed tohoto děliče a zem se připojují sluchátka s běžnou impedancí. Údaje ke kontrole stejnosměrných napětí na tranzistorech koncového zesilovače jsou přehledně uvedeny v tabulce 3. Deska s ploš-

Tab. 3. Stejnosměrná napětí na elektrodách tranzistorů koncového zesilovače (napájecí napětí 55 V)



Tranzistor	U_B [V]	U_C [V]	U_E [V]
T_{10}	5,5	1,25	6
T_{11}	27,5	29,5	26,5
T_{12}	1,25	26,5	—
T_{13}	—	29,5	27,5
T_{14}	—	26,5	27,5
T_{15}	29,5	55	28,8
T_{16}	26,9	1,25	27,5
T_{17}	28,8	55	28,2
T_{18}	1,25	27,5	0
T_{19}	28,2	55	27,5
T_{20}	0,8	27,5	0

Poznámka. Napětí jsou měřena Avometem II na příslušném nejmenším napěťovém rozsahu (proti zemi zesilovače).



Obr. 50. Osazená deska obou kanálů koncového zesilovače

nými spoji pro oba koncové zesilovače je na obr. 49 (str. 32 a 33) a obr. 50.

Provoz mono-stereo

Tlačítkem T_{101} , které je připojeno mezi oddělovací odpor R_{44} na výstupu předzesilovače a horní vývod potenciometru vyvážení kanálů (obr. 36) se spínají dohromady oba kanály stereofonního zesilovače. Obě reproduktorové soustavy mají tak při provozu mono stejný signál. Stejný signál je i na výstupním konektoru pro nahrávání na magnetofon. Provoz mono volíme např. tehdy, chceme-li nahrát stereofonní desku na monofonní magnetofon.

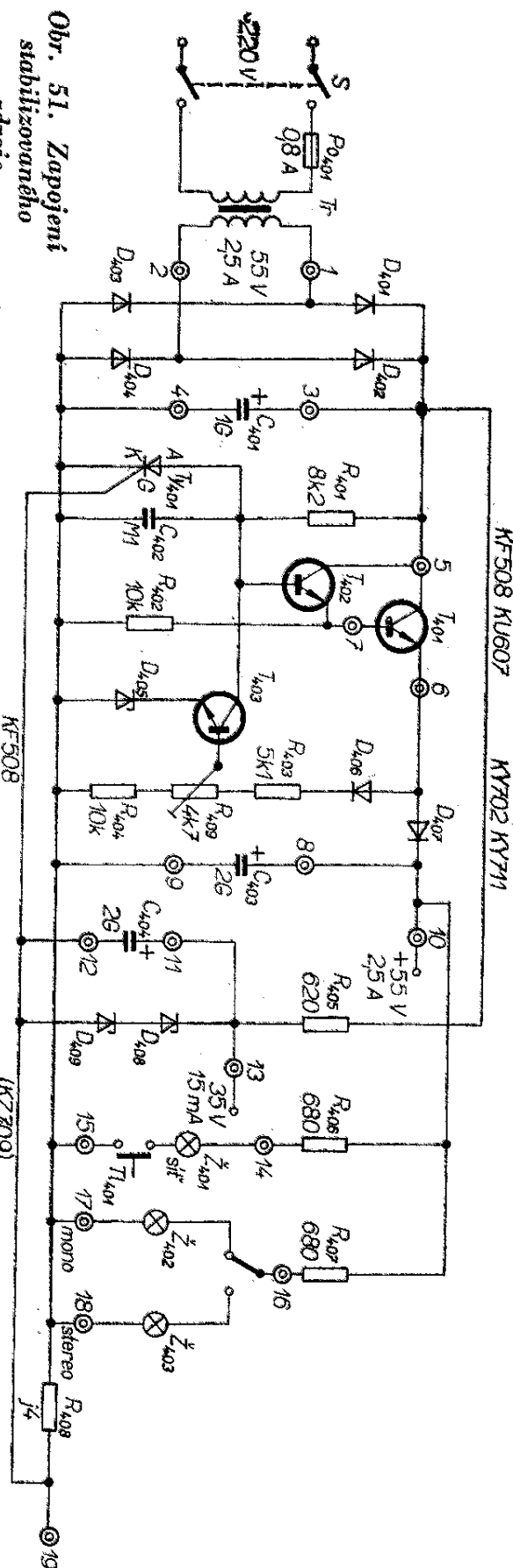
Stabilizovaný zdroj

K napájení zesilovače se používá stabilizovaný zdroj podle obr. 51, jímž se stabilizuje napájecí napětí 55 V. Zdroj se připojuje k síti spínačem S. Transformátor má sekundární vinutí na napětí 55 V, 50 Hz a proud 2,5 A. Po usměrnění sekundárního napětí můstkovým usměrňovačem se usměrněné napětí vyhlazuje kondenzátorem C_{401} . Vzhledem k tomu, že podle odběru proudu kolísá napětí na kondenzátoru C_{401} od 80 do 63 V, je třeba zesilovač vybavit stabilizovaným zdrojem, jímž se stabilizuje napájecí napětí pro výkonový zesilovač. Požadavkům na stabilizaci napájecího napětí vyhoví sériový stabilizátor s tranzistory T_{401} , T_{402} a T_{403} . Referenční napětí se získává na Zenerově diodě D_{405} . Tranzistor T_{403} pra-

cuje jako zesilovač chybového napětí. Současně srovnává část napětí z odporového děliče na výstupu s referenčním napětím Zenerovy diody. Rozdílovým napětím se přes budicí tranzistor T_{402} řídí výkonový sériový tranzistor T_{401} . Dioda D_{406} slouží k teplotní kompenzaci odporového děliče na výstupu. Kondenzátor C_{402} zlepšuje filtrační účinek stabilizátoru. K filtraci značně přispívá i velký elektrolytický kondenzátor C_{403} , připojený na výstup stabilizátoru. Výstupní odpor stabilizátoru je pro celý rozsah odběru proudu menší než $0,3 \Omega$.

Nf zesilovač je jištěn jednak pojistkou ve výkonovém zesilovači a jednak další elektronickou pojistkou ve stabilizovaném zdroji. Do série s vývodem záporného pólu stabilizátoru je zapojen malý odpor R_{408} . Při přetížení zdroje se zvětší napěťový úbytek na tomto odporu tak, že sepne tyristor Ty_{401} . Při sepnutí tyristoru bude napětí na bázi tranzistoru T_{402} velmi blízké napětí záporného pólu napájecího zdroje a tranzistory T_{402} a T_{401} se uzavrou. Odpor R_{408} má takovou velikost, aby stabilizovaný zdroj vypnul již při výstupním proudu 3 A. Za určitých zatěžovacích podmínek může tyristor sepnout dříve, než se zmenší napětí na elektrolytickém kondenzátoru C_{403} na nulu. V tomto případě by se objevilo na emitorových přechodech tranzistorů T_{401} a T_{402} velké napětí v závěrném směru a došlo by ke zničení těchto tranzistorů. Aby se tato možnost vyloučila, je mezi kladný pól stabilizátoru a filtrační kondenzátor C_{403} vložena dioda D_{407} .

42712}



Za diodou D_{407} jsou na výstup stabilizátoru připojeny (přes srážecí odpory R_{406} a R_{407}) žárovky k indikaci zapnutí zesilovače a provozu mono-stereo. Indikační žárovky se připojují na výstup stabilizátoru proto, aby nedocházelo ke kolísání jejich světelné intenzity při zesílení hudebních skladeb s velkou dynamikou.

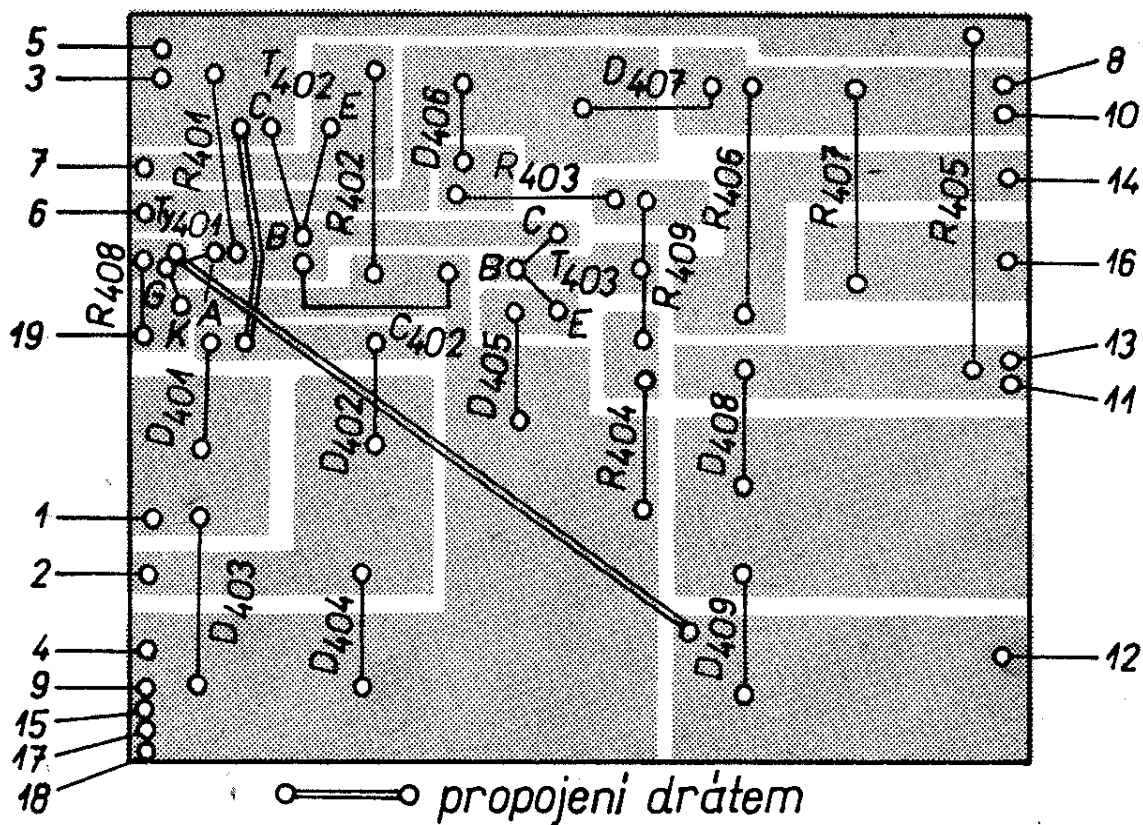
Pro napájení části zesilovače, která zpracovává signál s malou úrovní (předzesilovače a korekční zesilovače), se napětí stabilizuje odporem R_{405} a Zenerovými diodami D_{408} a D_{409} . K napájení stabilizačního obvodu se používá napětí z filtračního kondenzátoru C_{401} . Ke zlepšení filtrace a současně i k zajištění určitého časového zpoždění mezi zapnutím výkonového zesilovače a zesilovače signálu s malou úrovní je paralelně k Zenerovým diodám připojen elektrolytický kondenzátor C_{404} . Deska s plošnými spoji zdroje je na obr. 52 a 53.

Zbytkový brum v napájecích napětích je tak malý, že při správně zvoleném uložení stíněných propojovacích vodičů je odstup signálu od rušivého pozadí (při připojení kteréhokoli vstupu) větší než 70 dB.

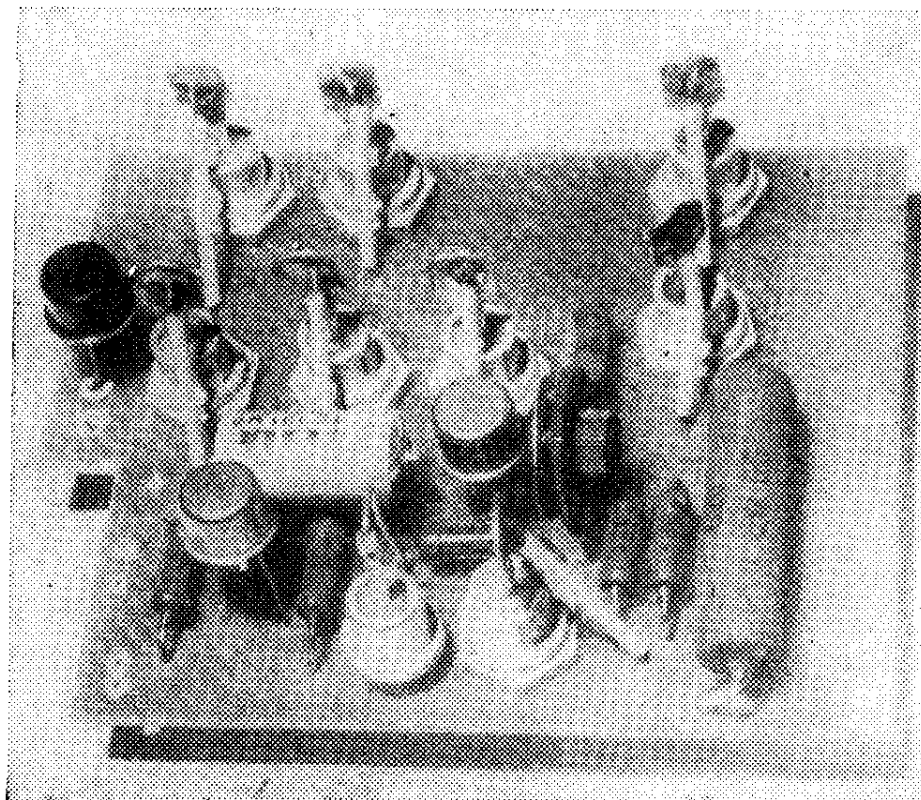
Odolnost zesilovače proti přebuzení

Při návrhu zesilovače byla velká pozornost věnována tomu, aby zesilovač mohl zpracovávat vstupní signály s velkou dynamikou a aby bylo možno připustit i určité odchylky od doporučených pracovních bodů tranzistorů v části zesilovače, která zpracovává signál s malou a střední úrovní (tolerance parametrů tranzistorů a odporů). Použilo se proto dostatečně velké napájecí napětí i dostatečně velké kolektorové proudy. Přemodulovatelnost předzesilovače je větší než 30 a u korekčního zesilovače větší než 5.

Regulátor hlasitosti je na výstupu korekčního zesilovače a potenciometr vyvážení kanálů na výstupu předzesilovače. Pokud bychom chtěli plně využít velké přemodulovatelnosti předzesilovače, lze umístit regulátor hlasitosti za předzesilovač a potenciometr vyvážení kanálů na výstup korekčního zesilovače.



Obr. 52. Deska s plošnými spoji stabilizovaného zdroje Smaragd D62



Obr. 53. Osazená deska stabilizovaného zdroje

Doporučení pro montáž stereofonního zesilovače

V popisu stereofonního zesilovače jsme se omezili především na popis zapojení a na rozbor elektrických parametrů. Vlastní rozložení jednotlivých dílů zesilovače a přesný postup montáže přenecháváme záměrně technické tvořivosti zájemců o stavbu.

Převážná většina elektronických prvků zesilovače je umístěna na čtyřech deskách s plošnými spoji. Deska s plošnými spoji stabilizovaného zdroje je na obr. 52. Na obr. 47 je deska se součástkami předzesilovače a korekčního zesilovače (pro jeden kanál) a na obr. 49 deska s oběma kanály výkonového zesilovače. Při stavbě stereofonního zesilovače osadíme nejprve desky s plošnými spoji elektronickými prvky podle rozpisky součástek. Nejlépe je osazovat desky nejprve menšími a lehčími prvky a nakonec připájet elektrolytické kondenzátory. Dále zhotovíme síťový transformátor a upravíme a osadíme odporové řadiče.

Pak je vhodné navrhnout celkovou koncepci rozmístění jednotlivých dílů zesilovače, tj. síťového transformátoru, desek s plošnými spoji, velkých elektrolytických kondenzátorů, chladičů výkonových tranzistorů, ovládacích a indikačních prvků na předním panelu a konektorů a pojistkového pouzdra na zadním panelu.

Při návrhu vnitřního uspořádání jednotlivých dílů je třeba souběžně navrhnout šasi a způsob uchycení součástek. Nejtěžším dílem zesilovače je síťový transformátor, který se musí umístit tak, aby nenarušoval stabilitu šasi. Současně je vhodné situovat síťový transformátor co nejdále od těch částí zesilovače, které zpracovávají signál. Rovněž přívody síťového napětí je třeba uložit co nejdále od vodičů signálové cesty.

Vzhledem k velkému výstupnímu výkonu zesilovače je třeba dostatečně dimenzovat chladiče výkonových tranzistorů.

U potenciometrů, řadičů, přepínačů a pouzder konektorů a tlačítek se osvědčuje propojit kovové části, které mohou přijít do styku s rukou, tlustším měděným vodičem se zemí zesilovače.

Boucherotův člen RC a odporový dělič

pro sluchátka se připájejí přímo na výstupní konektory. Rovněž vstupní odporové děliče pájíme přímo na vstupní konektory. Při uspořádání, které bylo zvoleno pro stavbu funkčního vzorku stereofonního zesilovače Hi-Fi stereo S 2×50 W, je použito šasi, skládající se z velmi malého počtu dílů. Přední nosný panel je ze skelného laminátu tloušťky 3 mm. Zadní panel zastává současně funkci chladiče pro všech pět výkonových tranzistorů i funkci nosné desky pro pouzdro síťové pojistky a pro všechny konektory. Je zhotoven z protlačovaného hliníkového profilu délky 50 cm a výšky 8 cm. Profil byl ve střední části po celé délce zeslaben frézováním na tloušťku o 5 mm menší, než je délka vývodů výkonových tranzistorů. Jedna strana zadního panelu byla v délce asi 10 cm ofrézována z obou stran tak, až vznikla rovná deska. Do této rovné plochy jsou vyvrtány díry pro uložení konektorů. Přední a zadní deska jsou mechanicky spojeny čtyřmi duralovými rozpěrnými sloupky, do nichž jsou na koncích vyříznuty závity. V těch místech panelů, kde jsou opřeny duralové rozpěrné sloupky, jsou vyvrtány díry pro spojovací šrouby se zapuštěnou hlavou. Spojení přední a zadní desky je ještě zpevněno základovým plechem, který je v levé straně šasi (při pohledu ze strany předního panelu). Na základový plech je připevněn síťový transformátor, deska s plošnými spoji stabilizátoru a rozměrné elektrolytické kondenzátory.

Desky s plošnými spoji zesilovačů, zpracovávající signál malé úrovně a desky s plošnými spoji výkonových zesilovačů jsou připevněny v pravé polovině šasi. Vzdálenost mezi deskami je nastavena trubičkovými rozpěrkami z tvrzeného papíru. Blíže k chladičí desce (tj. k zadnímu panelu) je umístěna deska s výkonovými zesilovači a blíže k přednímu panelu jsou desky s předzesilovači a korekčními zesilovači (umístěné do stínících krabiček). Pro zpřesnění popisu jsou na fotografiích na druhé až čtvrté straně obálky jednotlivé pohledy na zesilovač a desky s plošnými spoji.

Přední sklolaminátový panel slouží k uchycení ovládacích a indikačních prvků. Vlevo dole je tlačítko pro připo-

jení zesilovače k síti. Nad tlačítkem je žárovka k indikaci zapnutí zesilovače. V pravé horní části předního panelu jsou (v pořadí od pravého okraje) umístěny tandemový potenciometr k vyvážení kanálů, regulátor hlasitosti, regulátor výšek a regulátor hloubek. Vpravo dole jsou dva potenciometry mikrofonních předzesilovačů. Přibližně ve střední části dole je tlačítková souprava pro volbu jednotlivých vstupů a tlačítka pro volbu filtrů, pro vypnutí fyziologické korekce regulátoru hlasitosti a pro volbu provozu (mono-stereo). Pokud se nesežene vhodná tlačítková souprava, lze volit jednotlivé vstupy pomocí vhodně upraveného řadiče.

V levé části předního panelu blíže středu jsou upevněny žárovky k indikaci druhu provozu (mono-stereo).

Výsledné rozměry šasi jsou: šířka 50 cm, výška 8 cm a hloubka 25 cm. Vnější rozměry celodřevěné skříňky jsou přibližně o 2 cm větší, než jsou rozměry šasi. Před přední nosný panel je k přední straně skříňky uchycen maskovací přední panel s vhodným popisem a vhodnou povrchovou úpravou. Typové označení zesilovače je napsáno nad indikačními žárovkami druhu provozu.

Celková mechanická koncepce byla navržena tak, aby šasi bylo co nejvíce vylehčené a aby se dalo zhotovit běžnými prostředky. Rovněž byla plně respektována zásada co nejkratších propojovacích vodičů a snadné dostupnosti všech nastavovacích prvků.

Doporučení pro ožívání stereofonního zesilovače

Jakmile je zesilovač sestaven po mechanické stránce, můžeme přistoupit k propojování a ožívání jednotlivých částí zesilovače. Aby se ožívání sestaveného zesilovače co nejvíce zjednodušilo, doporučuji přezkoušet a předběžně nastavit všechny základní díly ještě před montáží. Při přezkoušení jednotlivých dílů i při ožívání smontovaného zesilovače se postupuje až na malé odchylky stejně.

Nejprve zkontrolujeme, zda jsou do plošných spojů vloženy správné součástky a zda jsou všechny součástky a propojovací vodiče dobře připájeny.

Při vlastním ožívání postupujeme od stabilizovaného zdroje přes koncové zesilovače ke korekčnímu zesilovači a předzesilovači.

Při ožívání stabilizovaného zdroje připojíme transformátor k síti a nastavíme napětí na výstupu stabilizátoru na 55 V (odporovým trimrem R_{409}). Současně také zjišťujeme, zda je napájecí napětí pro předzesilovač a korekční zesilovač 35 V. Dále ověříme funkci pojistky.

Při nastavování koncových zesilovačů vytočíme běžec trimru R_{212} na minimální hodnotu a běžec trimrů R_{208} a R_{227} a R_{228} nastavíme asi do poloviny dráhy. Při odpojení zátěže od výstupu připojíme nejprve jeden výkonový zesilovač ke stabilizovanému zdroji. Nastavíme odporový trimr R_{212} do takové polohy, aby byl klidový odběr proudu ze zdroje asi 30 až 50 mA. Trimrem R_{208} nastavíme výstup výkonového zesilovače asi na 27 V. Napájecí napětí musí být jmenovité, tj. 55 V. Dále zkontrolujeme, zda se nemění napětí v koncovém zesilovači při připojení zátěže 5 Ω . Vstup koncového zesilovače musí být připojen na zem, nebo musí být regulátor hlasitosti nastaven do nulové polohy. Konečně nastavíme ještě potenciometry R_{227} a R_{228} tak, aby správně pracovaly elektronické pojistky.

Zatímco u všech dosud popisovaných nastavovacích pochodů se vystačí s jedním nebo dvěma Avometry, při nastavování elektronických pojistek se musí použít osciloskop a tónový generátor. Na vstup výkonového zesilovače se přivede signál o napětí asi 300 mV (kmitočtu 1 kHz) a na zátěži 5 Ω se změří Avometem efektivní hodnota výstupního napětí. Podle potřeby se nastaví taková úroveň vstupního napětí, aby výstupní napětí bylo asi 16 V. Při této úrovni výstupního napětí nastavíme elektronickou pojistku tak, aby omezovala výstupní napětí při 10% zvětšení vstupního napětí (musí se výrazně objevit souměrné ořezávání obou půlvln výstupního napětí).

Obdobný postup nastavování používáme samozřejmě při nastavování obou kanálů výkonového zesilovače. Poslední prací bude nastavení korekčních zesilovačů a předzesilovačů. Před ožíváním je třeba připojit k příslušným pájecím bo-

dům propojovací vodiče od ovládacích prvků a přívody k napájecímu napětí. Spoje od regulátoru hlasitosti ke vstupům výkonových zesilovačů se prozatím ponechají odpojeny. Překontrolujeme napětí jak v kontrolních napájecích bodech (35 V, 20 V, 17,5 V), tak i na elektrodách tranzistorů. Bez zhoršení funkce lze připustit odchylky od doporučených optimálních napětí až $\pm 10\%$.

Předzesilovač a korekční zesilovač ověříme současně s přepínatelným předzesilovačem. Pro první ověření činnosti zvolíme mikrofonní vstup. Na vstup přivedeme napěťový signál asi 1 až 2 mV o kmitočtu 1 000 Hz. Při vypnutých filtrech a fyziologické regulaci změříme střídavé napětí na kolektoru tranzistoru T_9 . Napětí má být asi 1,2 V při vstupním signálu 1 mV. Současně ověříme správnou činnost regulátoru výšek a hloubek. Při zařazení libovolného stupně regulátoru výšek a hloubek nesmí dojít (na kmitočtu 1 kHz) ke změně napětí na regulátoru hlasitosti. Pokud je vše v pořádku, ověříme činnost předzesilovače a korekčního zesilovače zavedením signálu do dalších vstupů. Pak připojíme signál na vstup mikrofonního předzesilovače (1 mV) – při potenciometru P_1 vytočeném na maximum by měla být úroveň napětí na regulátoru hlasitosti asi 2,4 V.

Mikrofonní předzesilovač, který je zapojen téměř stejně jako přepínatelný předzesilovač, má zesílení asi dvakrát větší. Tento mikrofonní předzesilovač je určen pro mikrofon s menší účinností. Pokud se může předpokládat, že se bude používat mikrofon se střední nebo větší účinností, lze upravit zápornou střídavou zpětnou vazbu.

Dále ověříme činnost filtrů brumu a výšek a činnost regulátoru výšek a hloubek. Rovněž překontrolujeme činnost tlačítka volby provozu mono-stereo. Obdobně nastavíme a zkontrolujeme činnost předzesilovače a korekčního zesilovače druhého kanálu.

Tím jsou skončeny všechny hlavní práce při oživování zesilovače.

Různá nepříjemná překvapení si uspoříme promyšlenou volbou umístění propojovacích vodičů. Zásadně je nezbytné propojovat všechny živé spoje (kromě vo-

dičů k výkonovým tranzistorům) stíněnými kabely. Je také třeba vyvarovat se při umísťování vodičů vzniku smyček, do nichž by se mohlo indukovat rušivé napětí ze síťového transformátoru. Osvědčuje se i propojit všechny stínící a zemnicí vodiče do jednoho místa, nejlépe na záporný pól elektrolytického kondenzátoru C_{404} na výstupu napájecího zdroje.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat možnosti rozkmitání koncových křemíkových tranzistorů, které jsou podstatně více náchylné k parazitním oscilacím, než výkonové tranzistory germaniové. K nakmitávání může dojít i na kmitočtech vyšších než 100 kHz, kdy již běžné měřidlo jako Avomet neukazuje žádnou výchylku a reproduktory zvuk nepřenesou. Pokud jsou správně nastaveny elektronické pojistky ve výkonovém zesilovači a v napájecím zdroji, není nebezpečí zničení koncových tranzistorů. Rozkmitání výkonových tranzistorů bez signálu lze zjistit jednoduše např. osciloskopem nebo měřením klidového odběru proudu, popř. (což je velmi nepřesné) dotekem prstu.

Rozpiska součástek předzesilovače a koncového zesilovače

Polovodičové prvky

T_1 (101)	KC509	
T_2 (102)	KC509	
T_3 (103)	KC508	
T_4 (104)	KC509	
T_5 (105)	KC509	
T_6 (106)	KC508	
T_7 (107)	KC508	
T_8 (108)	KC508	
T_9 (109)	KC508	
T_{10} (110)	KF517	
T_{11} (111)	KC508	
T_{12} (112)	KC508	
T_{13} (113)	KF508	
T_{14} (114)	KF517	
T_{15} (115)	KF508	pár.
T_{16} (116)	KF517	
T_{17} (117)	KF508	pár.
T_{18} (118)	KF508	
T_{19} (119)	KU607	pár.
T_{20} (120)	KU607	
D_1 (181)	KA503	

Kondenzátory

C_1 (101)	10 μ F/6 V, TC 941
-------------	------------------------

C ₂ (102)	50 μF/6 V, TC 941
C ₃ (103)	5 μF/15 V, TC 943
C ₄ (104)	5 μF/15 V, TC 943
C ₅ (105)	10 μF/6 V, TC 941
C ₆ (106)	50 μF/6 V, TC 941
C ₇ (107)	1,5 nF, TK 720
C ₈ (108)	4,7 nF, TK 720
C ₉ (109)	6,8 nF, TK 720
C ₁₀ (110)	5 μF/10 V, TC 942
C ₁₁ (111)	5 μF/10 V, TC 942
C ₁₂ (112)	100 μF/25 V, TC 964
C ₁₃ (113)	5 μF/10 V, TC 942
C ₁₄ (114)	270 pF, TK 720
C ₁₅ (115)	270 pF, TK 720
C ₁₆ (116)	270 pF, TK 720
C ₁₇ (117)	270 pF, TK 720
C ₁₈ (118)	5 μF/10 V, TC 942
C ₁₉ (119)	2 μF/15 V, TC 943
C ₂₀ (120)	0,1 μF, TK 720
C ₂₁ (121)	1,5 nF, TK 720
C ₂₂ (122)	5 μF/10 V, TC 942
C ₂₃ (123)	0,1 μF, TK 720
C ₂₄ (124)	2 μF/15 V, TC 943
C ₂₅ (125)	68 nF, TK 720
C ₂₆ (126)	560 pF, TK 720
C ₂₇ (127)	560 pF, TK 720
C ₂₈ (128)	560 pF, TK 720
C ₂₉ (129)	560 pF, TK 720
C ₃₀ (130)	2 μF/15 V, TC 943
C ₃₁ (131)	100 μF/30 V, TC 904
C ₃₂ (132)	2 μF, TC 180
C ₃₃ (133)	2 μF/15 V, TC 943
C ₃₄ (134)	10 μF/50 V, TC 965
C ₃₅ (135)	10 μF/25 V, TC 977
C ₃₆ (136)	50 μF/25 V, TC 964
C ₃₇ (137)	15 pF, TK 720
C ₃₈ (138)	100 μF/25 V, TC 964
C ₃₉ (139)	1 nF, TK 720
C ₄₀ (140)	200 μF/6 V, TC 941
C ₄₁ (141)	1 nF, TK 720
C ₄₂ (142)	1 nF, TK 720
C ₄₃ (143)	47 nF, TK 721
C ₄₄ (144)	2 000 μF/50 V, TC 937
C ₄₅ (145)	0,1 μF, TK 720
C ₄₆ (146)	5 μF/10 V, TC 941
C ₄₇ (147)	1,5 nF, TK 720

Odpory a odporové trimry (odpory jsou typu TR 151)

R ₁ (101)	0,12 MΩ
R ₂ (102)	51 kΩ
R ₃ (103)	0,15 MΩ
R ₄ (104)	30 kΩ
R ₅ (105)	18 kΩ
R ₆ (106)	2,2 MΩ

R ₇ (107)	47 kΩ
R ₈ (108)	5,6 kΩ
R ₉ (109)	1,5 MΩ
R ₁₀ (110)	47 kΩ
R ₁₁ (111)	1 kΩ
R ₁₂ (112)	0,15 MΩ
R ₁₃ (113)	10 kΩ
R ₁₄ (114)	0,12 MΩ
R ₁₅ (115)	560 Ω
R ₁₆ (116)	0,18 MΩ
R ₁₇ (117)	330 kΩ
R ₁₈ (118)	120 kΩ
R ₁₉ (119)	51 kΩ
R ₂₀ (120)	330 Ω
R ₂₁ (121)	470 Ω
R ₂₂ (122)	15 kΩ
R ₂₃ (123)	2,7 kΩ
R ₂₄ (124)	100 kΩ
R ₂₅ (125)	33 kΩ
R ₂₆ (126)	56 kΩ
R ₂₇ (127)	1 MΩ
R ₂₈ (128)	560 Ω
R ₂₉ (129)	180 kΩ
R ₃₀ (130)	330 kΩ
R ₃₁ (131)	120 kΩ
R ₃₂ (132)	51 kΩ
R ₃₃ (133)	330 Ω
R ₃₄ (134)	470 Ω
R ₃₅ (135)	15 kΩ
R ₃₆ (136)	2,7 kΩ
R ₃₇ (137)	10 kΩ
R ₃₈ (138)	47 kΩ
R ₃₉ (139)	30 kΩ
R ₄₀ (140)	680 kΩ
R ₄₁ (141)	47 kΩ
R ₄₂ (142)	470 kΩ
R ₄₃ (143)	5,1 kΩ
R ₄₄ (144)	22 kΩ
R ₄₅ (145)	1,5 kΩ
R ₄₆ (146)	4,7 kΩ
R ₄₇ (147)	33 kΩ
R ₄₈ (148)	15 kΩ
R ₄₉ (149)	15 kΩ
R ₅₀ (150)	15 kΩ
R ₅₁ (151)	180 kΩ
R ₅₂ (152)	1 MΩ
R ₅₃ (153)	4,7 kΩ
R ₅₄ (154)	220 Ω
R ₅₅ (155)	51 kΩ
R ₅₆ (156)	33 kΩ
R ₅₇ (157)	3,3 kΩ
R ₅₈ (158)	4,7 kΩ
R ₅₉ (159)	15 kΩ
R ₆₀ (160)	18 kΩ

R_{61} (161)	4,7 k Ω
R_{62} (162)	330 k Ω
R_{63} (163)	270 k Ω
R_{64} (164)	4,7 k Ω
R_{65} (165)	36 k Ω
R_{66} (166)	22 k Ω
R_{67} (167)	27 k Ω
R_{68} (168)	15 k Ω
R_{69} (169)	15 k Ω
R_{70} (170)	15 k Ω
R_{71} (171)	1 M Ω
R_{72} (172)	4,7 k Ω
R_{73} (173)	220 Ω
R_{74} (174)	1,2 k Ω , TR 152
R_{75} (175)	220 Ω
R_{76} (176)	680 k Ω
R_{77} (177)	120 Ω
R_{78} (178)	560 k Ω
R_{79} (179)	4,7 k Ω
R_{80} (180)	10 k Ω
R_{81} (181)	180 k Ω
R_{82} (182)	180 k Ω
R_{83} (183)	= R_9 (109)
R_{201} (301)	1 k Ω
R_{202} (302)	47 k Ω
R_{203} (303)	10 k Ω
R_{204} (304)	47 k Ω
R_{205} (305)	47 k Ω
R_{206} (306)	560 Ω
R_{207} (307)	1 k Ω
R_{208} (308)	2,2 k Ω , TP 035
R_{209} (309)	4,7 k Ω
R_{210} (310)	27 k Ω
R_{211} (311)	3,3 k Ω
R_{212} (312)	2,2 k Ω , TP 035
R_{213} (313)	820 Ω
R_{214} (314)	390 Ω
R_{215} (315)	5,6 k Ω
R_{216} (316)	150 Ω
R_{217} (317)	4,7 k Ω
R_{218} (318)	330 Ω
R_{219} (319)	1 k Ω
R_{220} (320)	1 k Ω
R_{221} (321)	100 Ω
R_{222} (322)	1 k Ω
R_{223} (323)	470 Ω
R_{224} (324)	470 Ω
R_{225} (325)	100 Ω
R_{226} (326)	100 Ω
R_{227} (327)	220 Ω
R_{228} (328)	220 Ω
R_{229} (329)	0,5 Ω (vinutý)
R_{230} (330)	0,24 Ω (vinutý)
R_{231} (331)	0,5 Ω (vinutý)

R_{232} (332)	100 k Ω
R_{233} (333)	47 Ω , TR 106
R_{234} (334)	5,6 k Ω
R_{235} (335)	680 Ω

Potenciometry

P_1 (101)	100 k Ω , logar., TP 28 080 A
P_2 (102)	10 k Ω , lineár., TP 28 360 A
P_3 (103), P_4 (104) a P_5 (105)	viz obr. 40 a 45

Přepínače

$Př_1$	osmipolohový čtyřpatrový přepínač (popř. tlačítková souprava)
--------	--

Tlačítka

TI_1 (101) až TI_5 (105)	tlačítka se dvěma přepínacími kontakty s aretací
------------------------------	--

Rozpiska součástek síťového zdroje

Polovodičové prvky

T_{401}	KU607 (KU605)
T_{402}	KF508
T_{403}	KF508
D_{401}	KY711
D_{402}	KY711
D_{403}	KY711
D_{404}	KY711
D_{405}	KZ715
D_{406}	KY702
D_{407}	KY711
D_{408}, D_{409}	dvojice Zenerových diod vybraná pro 35 V, 30 mA, KZ709 + KZ711 nebo KZ709 + KZ712
Ty_{401}	KT502

Kondenzátory

C_{401}	1 000 μ F/150 V, TC 939
C_{402}	0,1 μ F, TC 181
C_{403}	2 000 μ F/50 V, TC 937
C_{404}	2 000 μ F/50 V, TC 937

Odpory

R_{401}	8,2 k Ω , TR 152
R_{402}	10 k Ω , TR 152
R_{403}	5,1 k Ω , TR 152
R_{404}	10 k Ω , TR 152
R_{405}	620 Ω , TR 507
R_{406}	680 Ω , TR 154
R_{407}	680 Ω , TR 154
R_{408}	0,4 Ω , vinutý
R_{409}	4,7 k Ω , TP 035

Ostatní součástky

Tr	transformátor 220 V/55 V, 2,5 A
Po_{401}	pojistka 0,8 A
$Ž_{401}$	žárovka 24 V/50 mA, telefonní
$Ž_{402}$	žárovka 24 V/50 mA, telefonní
$Ž_{403}$	žárovka 24 V/50 mA, telefonní
S	síťový spínač nebo tlačítko s aretací

Příklady obvodů stereofonních zesilovačů

Vstupní předzesilovač a korekční zesilovač

Vstupní předzesilovače stereofonních zesilovačů je možno rozdělit na lineární předzesilovače, určené pro zesílení napětí z mikrofonu, krystalové přenosky nebo z tuneru a na korekční předzesilovače, používané pro zesílení napětí z magnetofonové hlavy nebo magnetické přenosky.

Obvykle se slučují předzesilovač a korekční zesilovač tak, že se používá jeden předzesilovač s přepínatelnými větvemi záporné zpětné vazby. Další úvahy budou převážně vycházet z použití křemíkových tranzistorů.

Pro zajištění požadovaných vlastností musí předzesilovač splňovat některé velmi důležité požadavky. Pracovní režim i typy tranzistorů musí být voleny tak, aby předzesilovač pracoval s minimálním šumem pro zvolený vnitřní odpor generátoru signálu. Dále musí mít předzesilovač dostatečné zesílení při určitém zvoleném kmitočtu signálu a předepsanou kmitočtovou charakteristiku napětového zesílení. Rovněž musí být u předzesilovače zajištěna vyhovující teplotní stabilita, minimální amplitudové zkreslení zesilovaného signálu a dostatečná přebuditelnost. Vzhledem k zajištění minimálního intermodulačního zkreslení a dobrého impedančního přizpůsobení ke zvoleným zdrojům signálu má mít předzesilovač optimální vstupní impedanci, kmitočtově co nejméně závislou. Rovněž výstupní impedance nemá přesáhnout určitou mez, aby bylo možno bez obtíží připojit k výstupu předzesilovače další části zesilovače. Velmi důležitou podmínkou činnosti předzesilovače je stabilita proti nežádoucím vysokofrekvenčním oscilacím a relaxačním kmitům. Pro snadnost nastavení i pro záměnnost tranzistorů má mít předzesilovač vyhovující odolnost proti běžnému tolerančnímu rozptylu proudového zesilovacího činitele tranzistorů.

Pro zajištění příznivých šumových poměrů se obvykle volí kolektorový proud

tranzistoru v prvním stupni předzesilovače v rozmezí od několika desítek až do několika stovek mikroampér. Ze stejného důvodu i s ohledem na přebuditelnost se volí u prvního tranzistoru napětí mezi kolektorem a emitorem v rozmezí asi 1 V až 5 V. Dnešní moderní křemíkové tranzistory typu KC509 mají i při těchto pracovních podmínkách dostatečný proudový zesilovací činitel i dostatečně vysoký mezní kmitočet f_T .

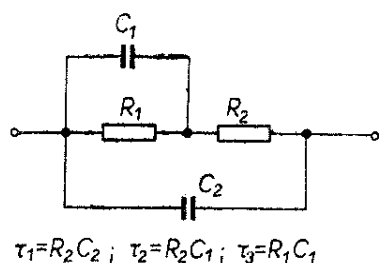
Jedním ze základních požadavků na vstupní předzesilovač je dostatečně velké napětové zesílení. Obvykle se volí zesílení předzesilovače se zpětnou vazbou na kmitočtu 1 kHz asi 50 až 100. Vzhledem ke kompenzaci kmitočtového průběhu signálu z magnetické přenosky musí být zajištěno u předzesilovače kmitočtově závislé (zápornou zpětnou vazbou) napětové zesílení hlubokých tónů 500 až 1 000. Aby byla dostatečná rezerva při zavádění zpětné vazby (pro minimální zkreslení) je vhodné, aby bylo napětové zesílení předzesilovače při rozpojené zpětné vazbě asi tři až desetkrát větší, tj. 2 000 až 10 000.

Vstupní odpor předzesilovače se volí obvykle asi desetkrát větší, než je vnitřní odpor zdroje signálu. Potřebná velikost vstupního odporu se získává podle způsobu zapojení předzesilovače vhodným sériovým odporem nebo volbou paralelního odporu, popř. vhodnými zpětnými vazbami nebo nejčastěji kombinací zpětných vazeb s některou z prvních dvou metod.

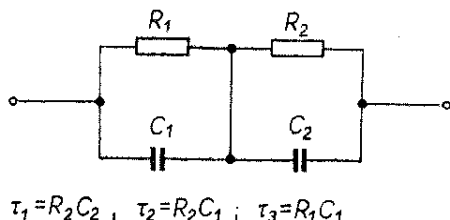
Kmitočtová charakteristika předzesilovače se jednak zabezpečuje volbou tranzistorů s dostatečně vysokým mezním kmitočtem f_T (což je běžně splněno u křemíkových epitaxně-planárních tranzistorů) a jednak volbou vhodných střídavých záporných zpětných vazeb. U lineárních vazeb určených k úpravě zesílení předzesilovače pro zpracování signálu z mikrofonu, krystalové přenosky nebo z tuneru se používají pouze odpory pro nastavení potřebného napětového zesílení.

Požaduje-li se u předzesilovače pro magnetickou přenosku korekce zesílení, používá se v záporné zpětné vazbě obvod RC se třemi časovými konstantami. Podle normy R.I.A.A. má mít zpětnovazební korekční obvod tři časové konstanty $\tau_1 =$

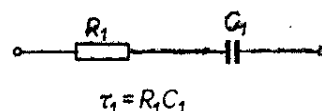
$= 75 \mu\text{s}$ (2 120 Hz), $\tau_2 = 318 \mu\text{s}$ (500 Hz) a $\tau_3 = 3\,180 \mu\text{s}$ (50 Hz), kterými je možno aproximovat výstupní napěťový signál z magnetické přenosky k ideální přenosové charakteristice. Při snímání magnetickou přenoskou se zvětšuje amplituda napětí od kmitočtu 50 Hz rychlostí, kterou je možno aproximovat směrnici 20 dB/dekádu. Od kmitočtu 500 Hz se rychlost zvětšování amplitudy napětí zpomaluje a je ji možno aproximovat směrnici se strmostí 0 dB/dekádu a konečně od kmitočtu 2 120 Hz se zvětšuje amplituda výstupního napětí rychlostí, kterou lze opět aproximovat směrnici 20 dB/dekádu. Použitý korekční obvod RC musí tento průběh kmitočtové závislosti amplitudy výstupního napětí magnetické přenosky přesně napodobovat. Vzhledem k tomu, že je korekční obvod RC zařazen do záporné zpětné vazby, bude kmitočtová závislost napěťového zesílení právě opačná, neboť zesilovač bude zesilovat více signály nižších kmitočtů a méně signály vyšších kmitočtů. Převádí-li se potom na vstup předzesilovače napětí z magnetické přenosky, bude mít výstupní napětí předzesilovače zcela vyrovnaný průběh v celém kmitočtovém rozsahu.



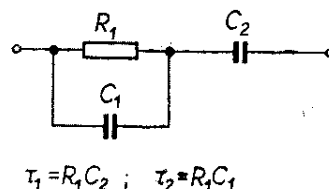
Obr. 54. Korekční člen ve zpětné vazbě předzesilovače pro magnetickou přenosku



Obr. 55. Častěji používané zapojení korekčního členu ve zpětné vazbě předzesilovače pro magnetickou přenosku



Obr. 56. Korekční člen s jednou časovou konstantou pro korekci zesílení předzesilovače pro magnetofonovou hlavu

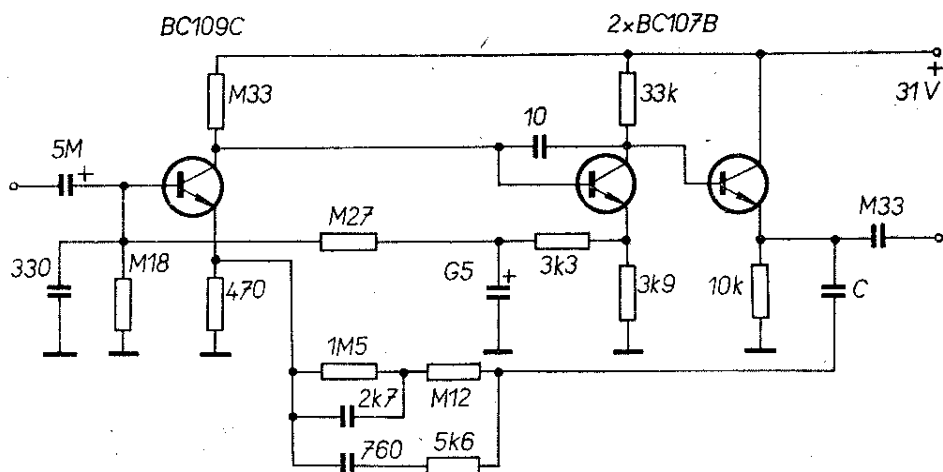


Obr. 57. Korekční člen se dvěma časovými konstantami k úpravě zesílení předzesilovače pro magnetofonovou hlavu

Požadovaný napěťový přenos je možno získat členem RC v zapojení podle obr. 54 nebo častěji používaným členem RC v zapojení podle obr. 55. Vztahy pro určení časových konstant jsou uvedeny u obrázků. Záporná zpětná vazba pro korekci napěťového zesílení se zavádí obvykle z kolektoru tranzistoru druhého stupně do emitoru tranzistoru prvního stupně. Aby byla zajištěna dostatečná přesnost funkce korekčního členu, je nutno, aby zatěžovací impedance druhého stupně byla 3,3 k Ω až maximálně 20 k Ω a emitorový odpor tranzistoru na prvním stupni nejméně 100 Ω .

U vstupního předzesilovače bývá obvykle zajištěna možnost zpracování napětí i z magnetofonové hlavy. Zesilovač pro nahrávání na magnetofonový pásek je řešen tak, že se signál zaznamenává se dvěma časovými konstantami (podle evropské normy DIN 45 513) nebo s jednou časovou konstantou pro rychlost 9,5 cm/s ($\tau_1 = 100 \mu\text{s}$) a s druhou časovou konstantou pro rychlost 19 cm/s ($\tau_2 = 50 \mu\text{s}$). V evropské normě jsou pro rychlost 9,5 cm/s doporučeny časové konstanty $\tau_1 = 90 \mu\text{s}$ a $\tau_2 = 3\,180 \mu\text{s}$ a pro rychlost 19 cm/s jsou doporučeny časové konstanty $\tau_1 = 50 \mu\text{s}$ a $\tau_2 = 3\,180 \mu\text{s}$. Korekci pro vyrovnání kmitočtového průběhu s jednou časovou konstantou lze vytvořit obvodem RC podle obr. 56 a korekci pro kompenzaci kmitočtového průběhu se dvěma časovými konstantami obvodem RC podle obr. 57. Vztahy pro určení časových konstant jsou uvedeny v obrázcích.

Obr. 58. Zapojení předzesilovače ze stereofonního zesilovače Fisher TX-1000



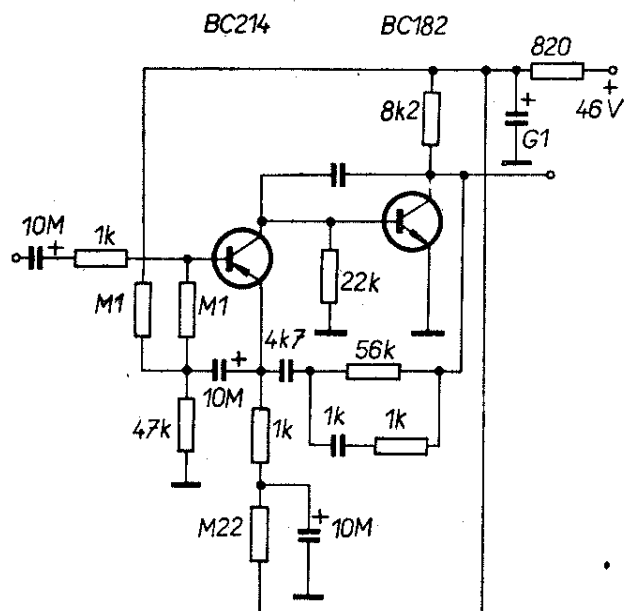
V dalším ukážeme několik typických zapojení předzesilovačů použitých ve stereofonních zesilovačích různých světových výrobců. Pro jednoduchost uvedeme tato zapojení pro případ buzení z magnetické přenosky.

Příkladem účelného řešení je předzesilovač použitý ve stereofonním zesilovači TX-1000 fy Fisher (obr. 58). Předzesilovač je vytvořen přímovázanou trojicí tranzistorů typu BC109C a BC107B. První dva tranzistory pracují v zapojení se společným emitorem a podílejí se na napětovém zesílení signálu. Hlavní část zesílení se získává na druhém stupni. Druhý stupeň pracuje s vysokou přebuditelností. Pro oddělení předzesilovače od další části zesilovače slouží emitorový sledovač. Zlepšení kmitočtové stability zajišťuje malý kondenzátor mezi kolektorem a bází tranzistoru na druhém stupni. Stejnoseměrné pracovní podmínky se nastavují odporem 0,27 MΩ z emitoru druhého tranzistoru do báze prvního stupně. Touto stejnosměrnou zápornou zpětnou vazbou se rovněž zabezpečuje teplotní stabilizace prvních dvou stupňů předzesilovače. Napětové zesílení pro výstupní signál z magnetické přenosky se koriguje obvodem RC ve střídavé záporné zpětné vazbě z výstupu do báze prvního tranzistoru. Tato střídavá záporná zpětná vazba současně zvětšuje vstupní odpor předzesilovače.

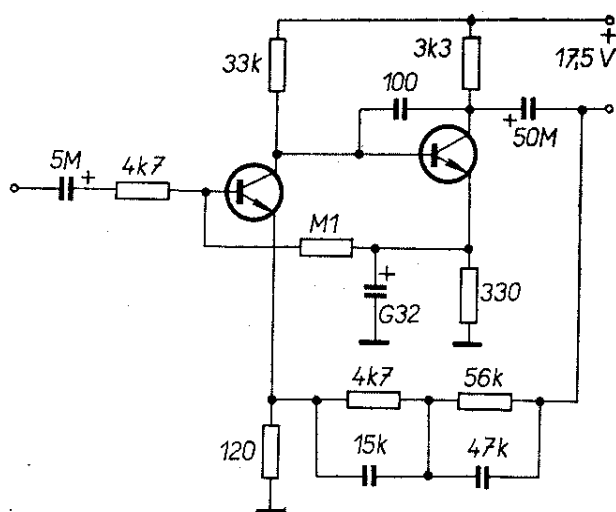
Moderní křemíkové tranzistory mají obvykle velmi malý bílý šum. Spíše se uplatňuje výstřelový šum (zvýšenou měrou při nízkých kmitočtech). Proto se pro špičková provedení předzesilovačů volí tranzistory s ohledem na dosažení co

nejmenšího výstřelového šumu. Obvykle jsou z tohoto hlediska lepší křemíkové tranzistory s vodivostí typu p-n-p než křemíkové tranzistory s vodivostí typu n-p-n. Výborné výsledky dává použití křemíkových tranzistorů s vodivostí typu p-n-p s typovým označením BC154, BC214 a BFX37.

S tranzistorem typu BC214 je konstruován předzesilovač podle obr. 59, který je použit ve stereofonním zesilovači firmy Telefunken typu V250-hifi. Druhý stupeň předzesilovače je osazen tranzistorem BC182 s malým šumem a s vodivostí typu n-p-n. Při použití komplementárních tranzistorů nebylo možné použít k nastavení stejnosměrných pracovních podmínek stejnosměrnou zápornou zpětnou



Obr. 59. Zapojení předzesilovače ze zesilovače Telefunken V250-hifi (neoznačený kondenzátor má kapacitu 47 pF)



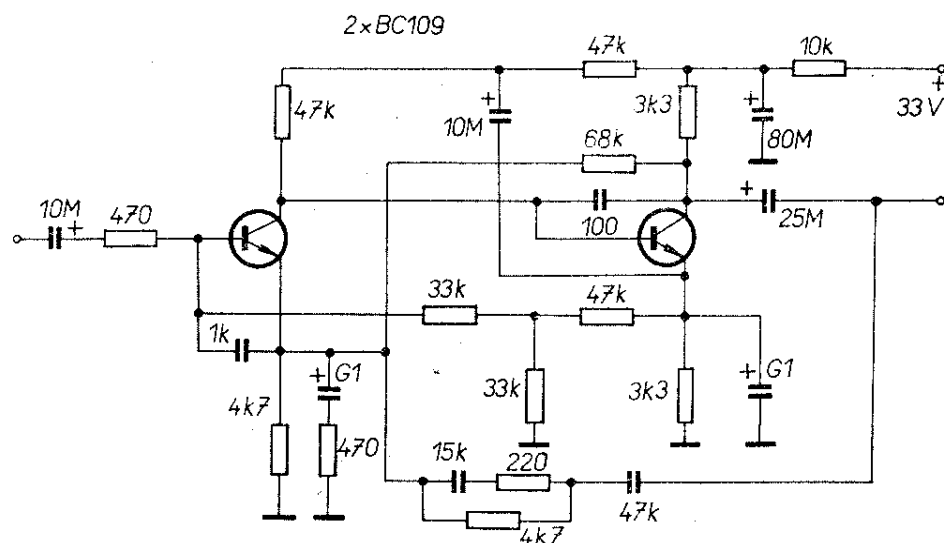
Obr. 60. Zapojení předzesilovače Dynaco

vazbu. Stejnoseměrné pracovní podmínky se u tohoto předzesilovače nastavují tzv. „bootstrapovým“ zapojením prvního tranzistoru. Pro napájení báze prvního tranzistoru se použil odporový dělič s odpory $100\text{ k}\Omega$ a $47\text{ k}\Omega$. Báze tranzistoru je připojena přes odpor $100\text{ k}\Omega$ na střed děliče, který je pro střídavé signály blokován elektrolytickým kondenzátorem k emitoru. Odporový dělič v bázi a především emitorový odpor zabezpečují teplotní stabilizaci tranzistoru BC214. Druhý tranzistor je teplotně stabilizován pouze slabě (kolektorovým odporem $22\text{ k}\Omega$). Uvedené zapojení má velký vstupní odpor. Odpor $100\text{ k}\Omega$ je vazbou přes kondenzátor $10\text{ }\mu\text{F}$ připojen paralelně k odporu přechodu báze-emitor, takže vstupní odpor je přibližně určen součinem prou-

dového zesilovacího činitele s výsledným odporem paralelní kombinace $(100\text{ k}\Omega \parallel 47\text{ k}\Omega \parallel 1\text{ k}\Omega) + R_{BE}$. Fázové změny v předzesilovači jsou kompenzovány kondenzátorem 47 pF . Tento kondenzátor a sériový odpor $1\text{ k}\Omega$ na vstupu přispívají k zajištění kmitočtové stability předzesilovače. Napěťové zesílení se koriguje obvodem RC se třemi časovými konstantami.

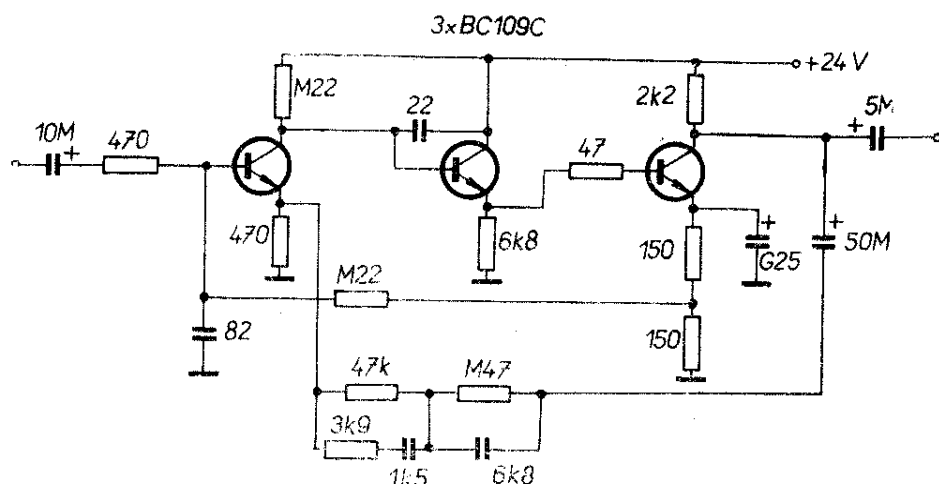
Dalším příkladem je zapojení předzesilovače na obr. 60 ze stereofonního zesilovače firmy Dynaco. Toto zapojení vychází z dnes již klasické koncepce. Je obdobné jako zapojení na obr. 58. Tím, že se v zapojení nepoužívá emitorový sledovač, zmenšuje se dosažitelný napěťový zisk a zapojení má malou rezervu zesílení při korekci nízkých kmitočtů z magnetické přenosky.

Velmi zajímavě je řešen předzesilovač podle obr. 61 ze stereofonního zesilovače Beolab 5000 dánské firmy Bang-Olufsen. Dvoustupňový předzesilovač je osazen tranzistory BC109C. Stejnoseměrné pracovní podmínky jsou nastaveny a teplotní stabilita předzesilovače je zajištěna příčnou stejnosměrnou vazbou přes odpor $33\text{ k}\Omega$ z děliče emitoru druhého tranzistoru do báze prvního tranzistoru. Napěťové zesílení je určeno velikostí stejnosměrné záporné zpětné vazby z kolektoru druhého tranzistoru do emitoru prvního tranzistoru. Na úpravě napěťového zesílení se také podílí korekční obvod pro magnetickou přenosku. Sériový odpor $470\text{ }\Omega$ v bázi a kondenzátor 1 nF mezi bází a emitorem prvního tranzistoru omezují



Obr. 61. Zapojení předzesilovače ze stereofonního zesilovače Beolab dánské firmy Bang a Olufsen

Obr. 62. Zapojení
předzesilovače
Telefunken



přenos pro signály s kmitočtem nad horní částí přenášeného pásma. K úpravě fázových poměrů a k zajištění kmitočtové stability slouží kondenzátor 100 pF z kolektoru na bázi druhého tranzistoru.

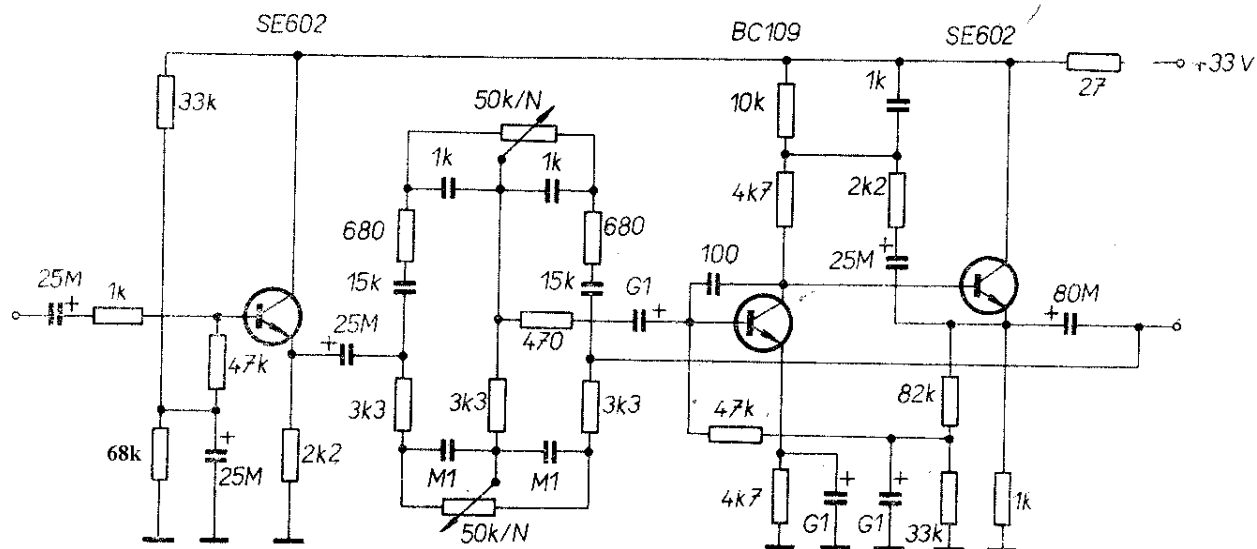
Nejvýhodnějším řešením vstupního předzesilovače je zapojení na obr. 62. Tento předzesilovač byl navržen firmou Telefunken. Zařazením emitorového sledovače mezi stupně s tranzistory a zapojením tranzistorů se společným emitorem je možno podstatně zvětšit napěťové zesílení prvního stupně a tím i celého předzesilovače. Při tomto uspořádání může být napěťové zesílení při rozpojené smyčce záporné střídavé zpětné vazby větší než 10 000. To již představuje spolehlivě velkou rezervu pro zápornou zpětnou vazbu. Výsledkem je, jak úprava ze-

sílení na dolním konci přenášeného akustického pásma, tak i značné zmenšení zkreslení zesilovače.

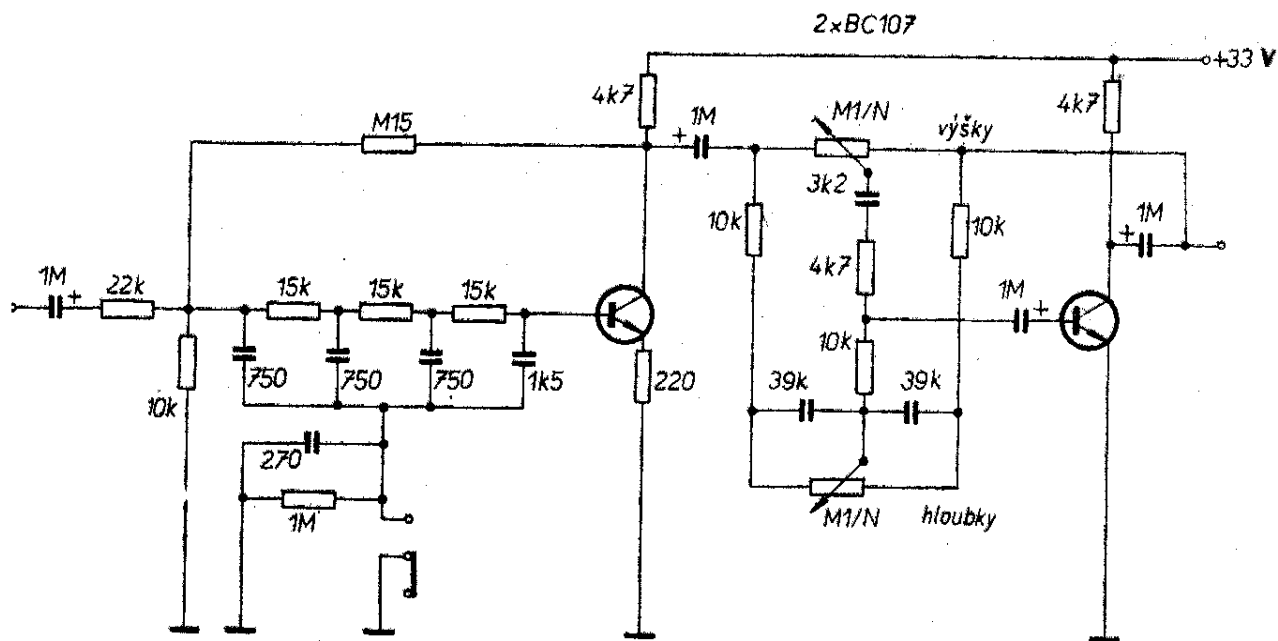
Korekční zesilovač

Další důležitou částí stereofonních zesilovačů je korekční zesilovač, který umožňuje nastavit žádanou šířku pásma přenášeného signálu.

Příkladem promyšleného řešení korekčního zesilovače je zapojení na obr. 63 převzaté ze stereofonního zesilovače Beolab 5000 firmy Bang-Olufsen. První stupeň pracuje jako emitorový sledovač s malou výstupní impedancí. Pracovní bod emitorového sledovače je nastaven odporovým děličem. Z malé výstupní impedance emi-



Obr. 63. Zapojení korekčního zesilovače firmy Bang - Olufsen

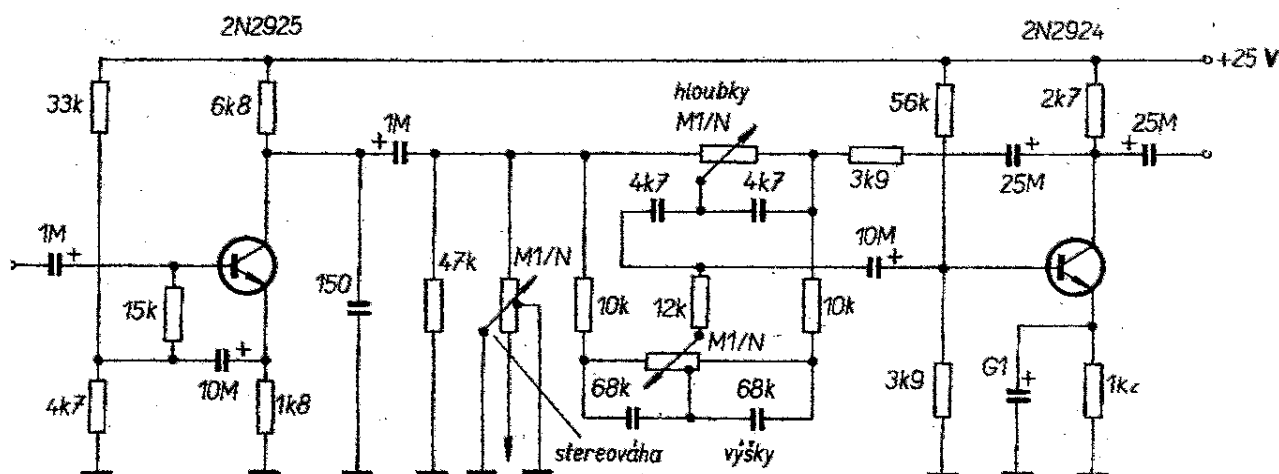


Obr. 64. Korekční předzesilovač ze stereofonního zesilovače Fisher TX-100

torového sledovače je napájen zpětnovazební korektor Baxandallova typu. Druhý stupeň (zapojený ve zpětné vazbě korektoru) pracuje s velkým napětovým zesílením. Aby bylo možno účinně využít velkého zesílení druhého stupně, je na výstup korekčního zesilovače zapojen oddělovací emitorový sledovač. U posledních dvou stupňů se pro nastavení stejnosměrné záporné zpětné vazby používá příčný odpor 47 k Ω (jako v předzesilovači). K omezení zesílení nad horním okrajem akustického pásma je k rozdělenému zatěžovacímu kolektorovému odporu připojen korekční kondenzátor 1 nF. Podle

údajů výrobce poskytuje korektor korekci výšek s dynamikou ± 14 dB na kmitočtu 10 kHz a korekci hloubek s dynamikou ± 17 dB na kmitočtu 50 Hz.

Jinou ukázkou korekčního zesilovače je zapojení na obr. 64, použité ve stereofonním zesilovači TX-100 americké firmy Fisher. Na vstupu zesilovače je šumový filtr s mezním kmitočtem 4 kHz. V zapojení se používá zpětnovazební korektor Baxandallova typu. Druhý stupeň (zapojený ve větvi zpětné vazby) pracuje opět s velkým napětovým zesílením, aby byla zaručena správná funkce korektoru. Podle specifikace výrobce koriguje korektor



Obr. 65. Korekční zesilovač z přístroje 388-C1 firmy Scott

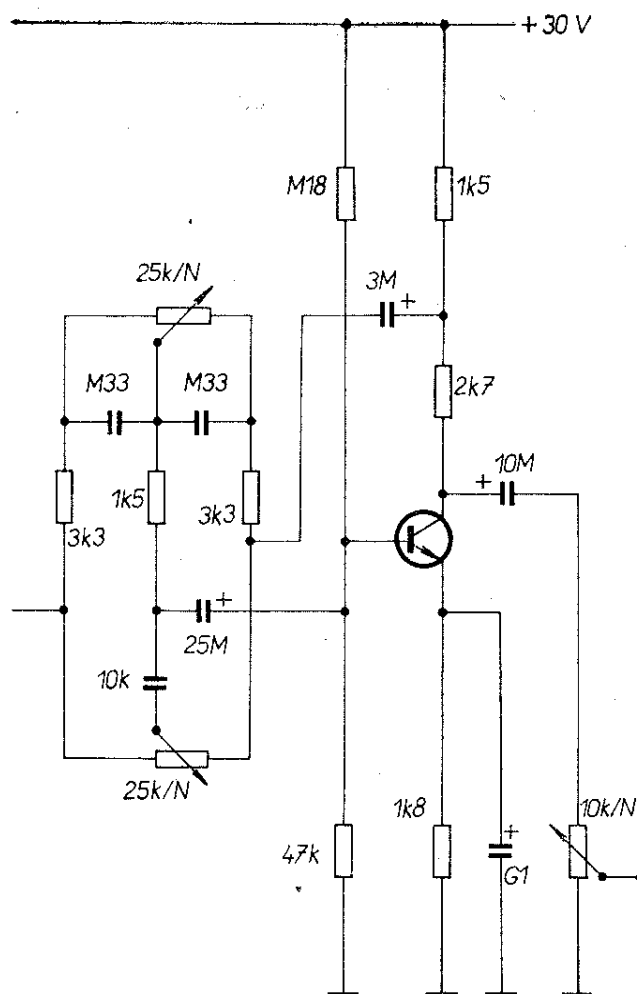
Zajímavě je řešen korekční zesilovač v tuneru s koncovým zesilovačem typu 388-C1 americké firmy Scott. Zapojení korekčního zesilovače je na obr. 65. První stupeň je v zapojení zvaném „bootstrap“, o němž jsme se již zmínili. K zvýšení odolnosti korekčního zesilovače proti vysokofrekvenčním oscilacím je kolektor prvního tranzistoru blokován malým

Jako příklad úsporného předzesilovače a korekčního zesilovače vyhovujících parametrů je na obr. 66 uvedeno zapojení nízkourovňového zesilovače americké firmy Fairchild. Tento zesilovač byl posta-



ven s tuzemskými součástkami, aby byl ověřen souhlas mezi naměřenými hodnotami a hodnotami parametrů, publikovanými firmou Fairchild. V zapojení na obr. 66 jsou uvedeny tuzemské typy tranzistorů. Pro předzesilovač byl použit tranzistor typu KF517 (vybrané kusy s co největším proudovým zesilovacím činitelem). Druhý stupeň je osazen tranzistorem typu KC509. Další stupeň je možno osadit tranzistory typu KC509, příp.

BC108



KC508. První dva stupně tvoří vstupní předzesilovač v běžném zapojení. Stejnoseměrné pracovní podmínky jsou nastaveny příčným odporem 150 k Ω . Vzhledem k tomu, že byly použity tuzemské tranzistory, bylo nutno zmenšit tento odpor s ohledem na souměrný rozkmit výstupního napětí na kolektoru tranzistoru na 120 k Ω . Kolektorový proud prvního tranzistoru je nastaven asi na 100 μ A; při tomto proudu je možné dosáhnout velmi malého šumu. Vstupní impedance je minimálně asi 50 k Ω pro všechny vstupy. Druhý stupeň pracuje s kolektorovým proudem asi 3 mA. Při tomto proudu je zaručena velká přebuditelnost.

Přepínatelnou zpětnou vazbou se upravuje napěťové zesílení pro různé druhy zdrojů signálu. Typické citlivosti vstupů na kmitočtu 1 kHz jsou: mikrofon – 1,4 V, tuner – 150 mV, magnetofonová hlava – 4,5 mV, magnetická přenoska – 6 mV, krystalová přenoska 150 mV. Bylo ověřeno, že s pasivními prvky s tolerancí $\pm 5\%$ ve zpětnovazebních obvodech je možno dosáhnout kmitočtový průběh napěťového zesílení pro magnetickou přenosku podle normy R.I.A.A. v pásmu 20 Hz až 20 kHz a pro magnetofonovou hlavu podle normy CCIR v pásmu 50 Hz až 15 kHz s odchylkami menšími než $\pm 1,5$ dB.

Za prvními dvěma stupni je zařazen fyziologický regulátor hlasitosti s potenciometrem (50 k Ω bez odbočky). Dále následují šumový filtr vytvořený dvojitým článkem T a filtr brumu sestavený z dvojitého integračního členu RC. Filtr šumu odřezává kmitočty na 15 kHz a filtr brumu potlačuje kmitočty pod 400 Hz.

Poslední část zesilovače tvoří korekční zesilovač s korektorem Baxandallova typu. Před korektorem je zařazen emitorový sledovač a tím je zaručeno, že je korektor napájen ze zdroje o malé vnitřní impedanci. Rozsah regulace hloubek na kmitočtu 20 Hz je +14,5 dB a –13,5 dB; rozsah regulace výšek na kmitočtu 20 kHz je +17 dB a –13 dB. Při střední poloze potenciometrů je kmitočtový průběh zvlněn jen nepatrně. Je ovšem nutno vybrat odpory a kondenzátory s tolerancí nejvýše $\pm 5\%$. Kanály se vyvažují tandemovým potenciometrem.

Celá koncepce zesilovače je navržena velmi jednoduše a přesto je tento zesilovač svými vlastnostmi v mnohém srovnatelný s daleko složitějšími zesilovači profesionálního provedení.

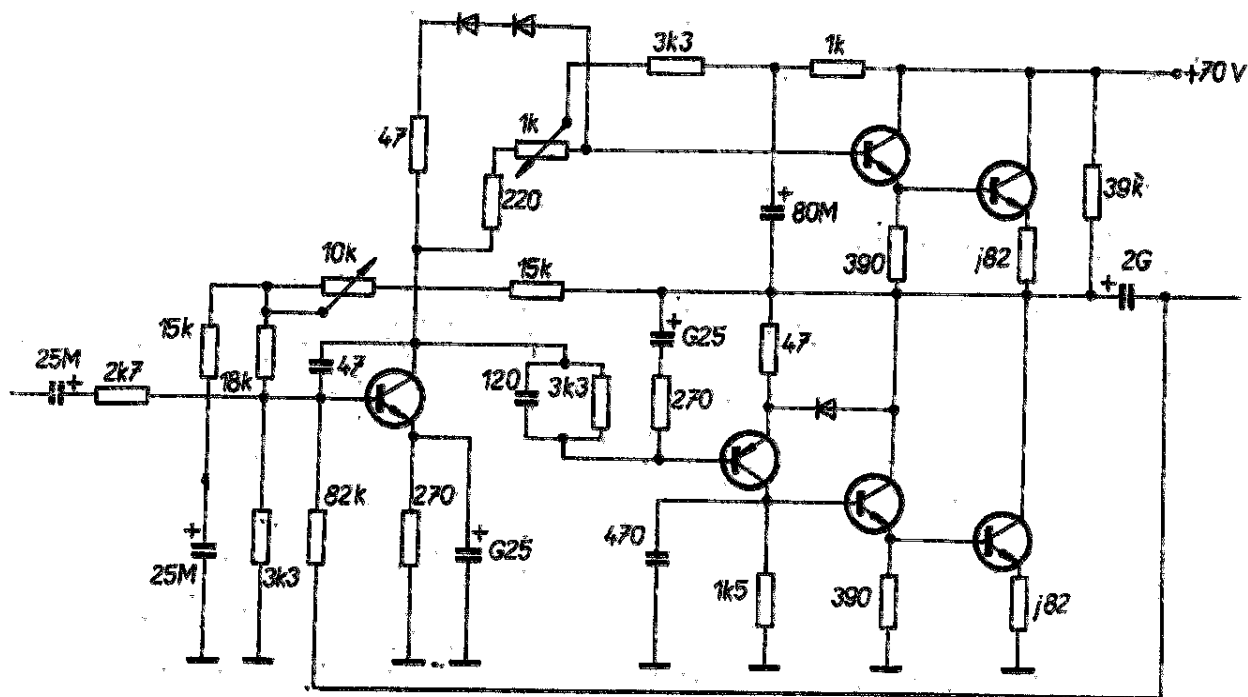
Výkonový zesilovač

Poslední část zesilovacího řetězce stereofonního zesilovače tvoří výkonový zesilovač. Moderní stereofonní zesilovače jsou převážně osazovány křemíkovými tranzistory, pouze v některých nejnovějších typech se již objevují i integrované monolitické obvody. V tomto pojednání jsme se omezili na zesilovače s křemíkovými tranzistory. Proto si dále ukážeme několik příkladů výkonových zesilovačů s křemíkovými tranzistory.

Příkladem dnes již klasického řešení výkonového zesilovače je zesilovač v přijímači typu 388-C1 firmy Scott. Zapojení výkonového zesilovače je na obr. 67. První tranzistor v zapojení se společným emitorem pracuje jako napěťový zesilovač. Odporem 1 k Ω zařazeným v kolektoru tohoto tranzistoru se nastavuje stupeň otevření budičů a koncového páru výkonových tranzistorů do „mírně otevřené“ třídy B. Odporem 10 k Ω se

posouvá stejnosměrné napětí na kolektoru prvního tranzistoru. Tento posuv se přes budičí tranzistory přenáší na koncový stupeň, kde dochází k posuvu stejnosměrného napětí na výstupu. Kondenzátory 47 pF a 120 pF slouží k fázové korekci a k zajištění kmitočtové stability výkonového zesilovače. Celkové napěťové zesílení je určeno dělicím poměrem odporového děliče, složeného z odporů 15 k Ω , 15 k Ω , 18 k Ω , 3,3 k Ω a potenciometru 10 k Ω . Pro zajištění teplotní stability slouží dvě diody, které jsou umístěny v dobrém tepelném kontaktu s chladičem výkonových tranzistorů. Odpory 0,82 Ω , zapojené do série s emitery výkonových tranzistorů, přispívají k linearitě výstupního napětí a současně působí jako částečná ochrana výkonových tranzistorů při přetížení. Při napájení ze zdroje 70 V může tento zesilovač dodat výstupní výkon 60 W při sinusovém tvaru výstupního napětí na zátěži 4 Ω . Zkreslení výstupního napětí nepřekročí 0,8 % a šířka přenášeného pásma je 20 Hz až 20 kHz a tolerancí přenosu ± 1 dB.

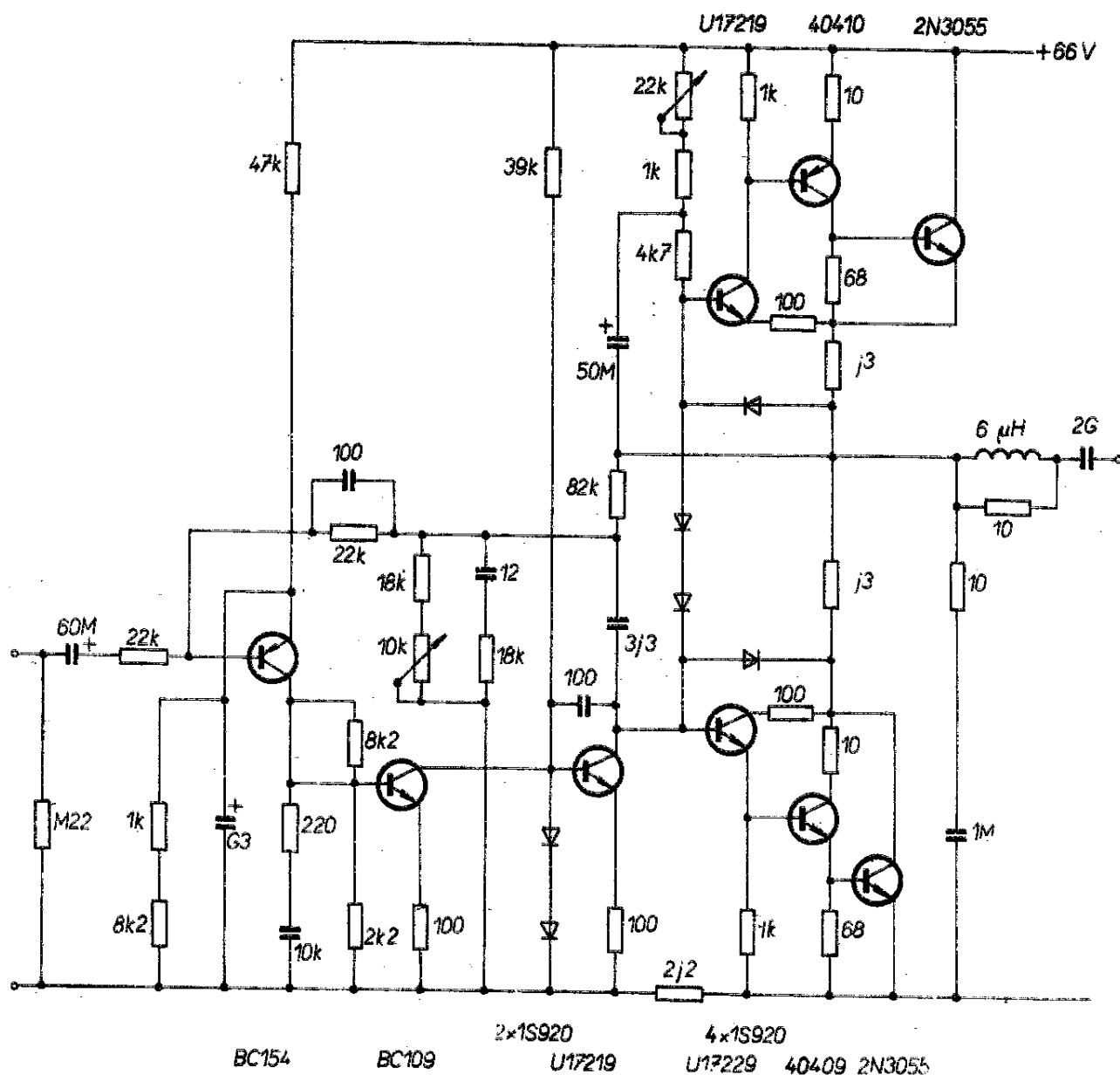
Jedním z nejlépe propracovaných výkonových zesilovačů je zesilovač typu 303 firmy Quad podle obr. 68. Zesilovač je jako v předchozím případě opět kvazikomplementární a pracuje ve třídě AB. Podstat-



Obr. 67. Výkonový zesilovač z tuneru Scott 388-C1

Typickým nedostatkem klasických kvazikomplementárních výkonových zesilovačů, které mají dvojici komplementárních tranzistorů v budiči a konec je osazen dvěma párovanými výkonovými tranzistory s vodivostí typu n-p-n, je nesymetrie vstupních impedancí obou polovin dvojčinného výkonového zesilovače. Jeden z výkonových tranzistorů

U zesilovače Quad 330 je budič složen ze dvou párů komplementárních tranzistorů. První pár tranzistorů typu U17219 a U17229 pracuje s menší výkonovou ztrátou a druhý pár komplementárních



Obr. 68. Zapojení výkonového zesilovače firmy Quad

tranzistorů 40409 a 40410 (RCA) má střední výkonovou ztrátu. Horní i dolní trojice tranzistorů má podobné vlastnosti jako emitorový sledovač s velkou vstupní impedancí, malou výstupní impedancí, velkým proudovým ziskem a velkým výkonovým ziskem. Z hlediska zatížení tranzistorů typu U17219 pracují obě trojice tranzistorů jako komplementární páry tranzistorů. Volbou emitorových a kolektorových odporů u obou komplementárních párů tranzistorů budiče je možno vyvážit symetrii vstupních impedancí budiče téměř pro plný rozsah pracovních podmínek zesilovače.

Zařazení malých odporů $0,3 \Omega$ do emitoru horního a do kolektoru dolního výkonového tranzistoru přispívá k teplotní stabilitě výkonového zesilovače. O úbytek napětí na těchto odporech se zvětšuje napětí na emitorech první dvojice tranzistorů budiče. Tyto tranzistory se uzavírají a zmenšuje se tak buzení koncových tranzistorů. Uvedená záporná zpětná vazba zvětšuje teplotní stabilitu a zmenšuje zkreslení zesilovače.

Jako elektronická pojistka pracují diody typu 1S920. Jakmile se napětí na bázích prvního páru tranzistorů budiče začne podstatněji lišit od napětí na výstupu koncového zesilovače, dojde otevřením diod k zapnutí pojistky. Jsou-li kolektorový proud dolního výkonového tranzistoru větší než asi $3,5 \text{ A}$, úbytky napětí na odporech otevřou diody, které omezí další buzení budičích tranzistorů. Pojistka je plně symetrická a chrání koncový zesilovač při obou polaritách střídavého napětí. Pojistka tedy omezuje proud koncových tranzistorů na $3,5 \text{ A}$. Kromě toho je v zesilovači ještě ochrana proti přebuzení (dvě limitující diody typu 1S920 v obvodu báze tranzistoru U17219).

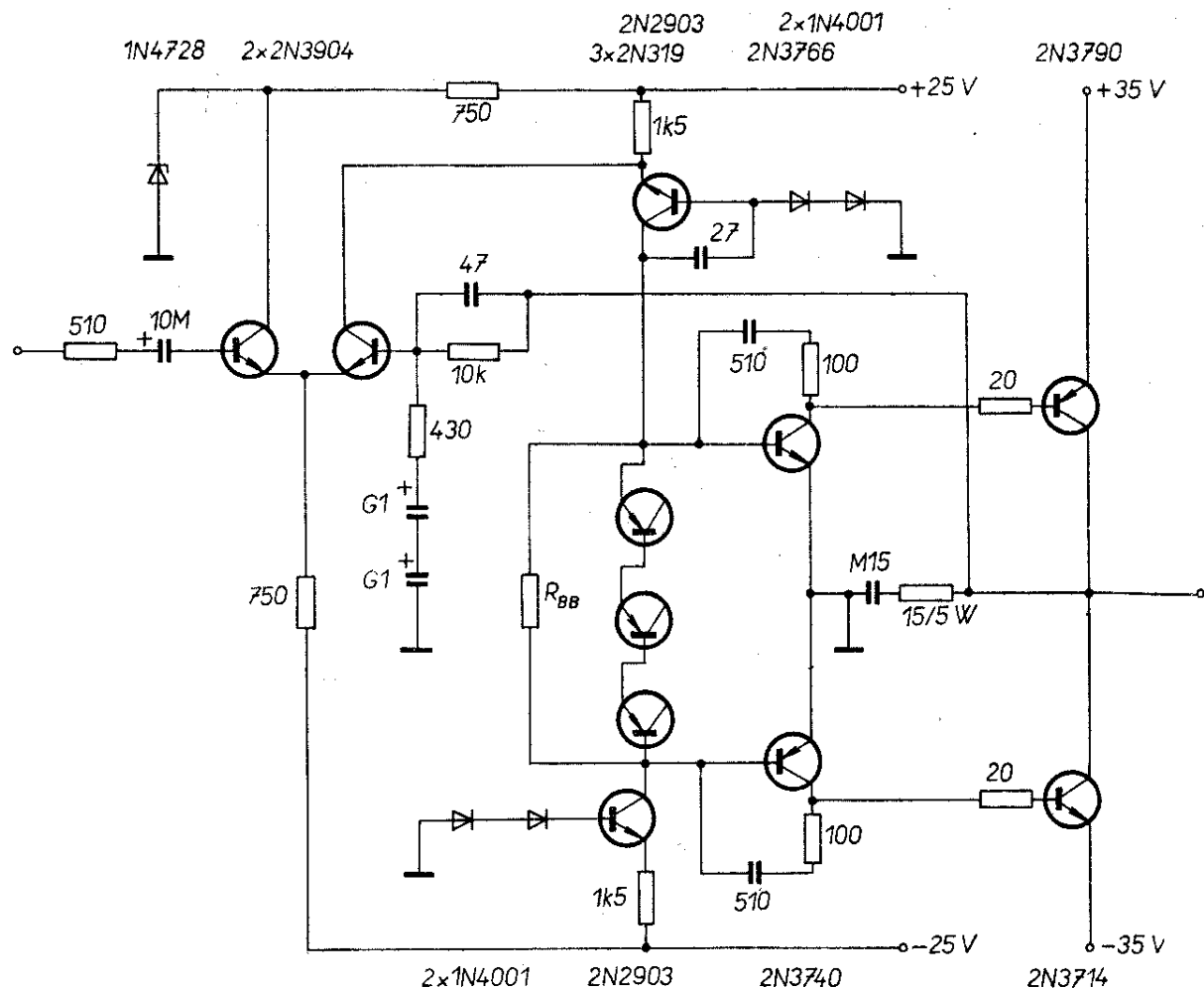
Dvě diody, zapojené mezi bázemi první dvojice tranzistorů budiče slouží ke kompenzaci vlivů teploty. Různé členy RC jsou určeny ke kompenzaci amplitudové a fázové charakteristiky napěťového zesílení a zajišťují tak kmitočtovou stabilitu zesilovače. Mezi výstup a zem je dále zapojen Boucherotův člen RC , který potlačuje kmitočty nad 100 kHz . K potlačení vysokofrekvenčních oscilací slouží

také tlumivka $8 \mu\text{H}$, zapojená do série s výstupem.

Zesilovač má špičkové vlastnosti, neboť při sinusovém výkonu 45 W na zátěži 8Ω a 28 W na 16Ω je v pásmu 10 Hz až 30 kHz odchylky $0,05 \%$ na kmitočtu 1 kHz a $0,1 \%$ na kmitočtu 10 kHz .

Nejlepší výsledky z hlediska věrnosti přenosu poskytují výkonové zesilovače s komplementárními koncovými tranzistory. Při testování v redakcích předních světových časopisů, zabývajících se technikou Hi-Fi se ukázalo, že některé stereofonní zesilovače (při objektivních testech technických parametrů vynikající) vykazují při subjektivních testech poslechem určité zabarvení v reprodukováném zvuku. Tomuto specifickému zabarvení se říká tranzistorový zvuk a je zajímavé, že podobné zabarvení zvuku nebylo zjištěno u elektronkových zesilovačů. Nejedná se přitom o žádný druh zkreslení, který by byl dostupnými měřicími přístroji zjištělný. Přitom se ukazuje, že pokud má stereofonní zesilovač tranzistorový zvuk, je výkonová část stereofonního zesilovače řešena vždy jako kvazikomplementární. Naopak se toto zabarvení zatím nezjistilo u zesilovačů, které jsou osazeny komplementárními koncovými tranzistory.

Příkladem moderně řešeného výkonového zesilovače s plně komplementárním budičem i koncovým stupněm je zapojení publikované v aplikačním manuálu firmy Motorola. Na obr. 69 je zapojení výkonového zesilovače s komplementárními koncovými tranzistory typu 2N3790 a 2N3714. Vstupní část zesilovače tvoří dva tranzistory 2N3904 v diferenciálním zapojení. Vstupní tranzistor pracuje jako emitorový sledovač s velkým vstupním odporem. Vazbou přes společný emitorový odpor je řízen druhý tranzistor, který pracuje v zapojení se společnou bází. Z kolektoru tohoto tranzistoru je buzena první dvojice komplementárních tranzistorů budiče. Diody v bázích (spolu se stejnými emitorovými odpory) slouží k nastavení souměrných pracovních podmínek budiče. Tranzistory, které jsou svými přechody báze-emitor zapojeny mezi kolektory první dvojice tranzistorů budiče, zajišťují teplotní stabilizaci druhé komplementární dvojice tranzistorů budiče a



Obr. 69. Zapojení výkonového zesilovače s doplňkovými koncovými tranzistory, vyvinuté firmou Motorola

tím i komplementárních koncových tranzistorů. Klidový proud koncových tranzistorů se pomocí odporu R_{BB} nastavuje asi na 20 až 40 mA.

K napájení zesilovače se používají dva dvojité symetrické napájecí zdroje. Přitom je nutno zabezpečit dobrou symetrii těchto zdrojů, jinak by mohlo dojít k poškození reproduktorové soustavy stejnosměrným proudem. Korekční obvody RC slouží k úpravě fázové a amplitudové charakteristiky napěťového zesílení zesilovače. Těmito úpravami se zajišťuje kmitočtová stabilita zesilovače. Výsledné napěťové zesílení je nastaveno odporovým děličem z výstupu (10 k Ω , 430 Ω) asi na 20. Při nelineárním zkreslení 0,5 % je výstupní sinusový výkon na kmitočtu 20 Hz asi 65 W, na 1 kHz asi 72 W a na 20 kHz asi 68 W. Tyto výstupní výkony platí při zátěži 8 Ω .

Kmitočtový rozsah je asi 10 až 150 000 Hz s odchylkou ± 1 dB. Intermodulační zkreslení je menší než 1 % při výstupním výkonu 50 W. Nelineární zkreslení je menší než 0,5 % pro uvedený kmitočtový rozsah až do výkonu 50 W.

Další výhodnou vlastností výkonových zesilovačů s doplňkovými tranzistory je lepší využití napájecího napětí pro rozkmit výstupního střídavého napětí.

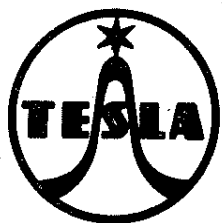
OBSAH

	Str.
Základní elektrické vlastnosti zesilovačů	2
Výstupní výkon	2
Zkreslení	3
Odstup a dynamika	4
Kmitočtová charakteristika	4
Vstupní citlivost	5

Vlastnosti výstupních obvodů . . .	6	Konstrukční část	
Všeobecné požadavky na vlastnosti zesilovačů	7	Stereofonní zesilovač S 2 × 50 W .	29
Regulátory kmitočtové charakteristiky	9	Technické parametry	29
Regulátory hlasitosti s fyziologickým průběhem	9	Předzesilovač	29
Doplňkové obvody	10	Vyvážení kanálů	35
Stereofonní nf zesilovače	11	Filtry a korekční zesilovač . . .	35
Konstrukční provedení zesilovačů .	13	Regulátor hlasitosti	39
Subjektivní hlediska při hodnocení reprodukce	13	Výkonový zesilovač	40
Měření nf zesilovačů	15	Stabilizovaný zdroj	44
Měření nf zesilovačů podle normy DIN 45 500	18	Doporučení pro montáž	45
		Oživování	48
		Rozpiska součástek	49
		Příklady obvodů stereofonních zesilovačů	52

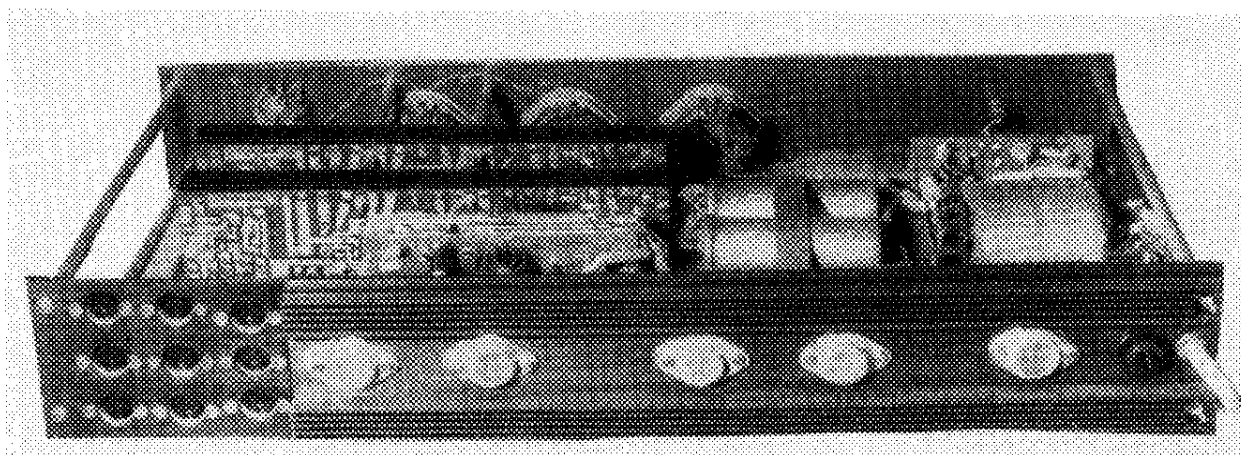
RADIOVÝ KONSTRUKTÉR – vydává Vydavatelství MAGNET, Praha 1., Vladislavova 26, telefon 234355-7 ● Šéfredaktor ing. František Smolík ● Redakce Praha 2, Lublaňská 57, tel. 223630 ● Redakční rada: K. Bartoš, ing. J. Čermák, CSc, K. Donát, O. Filka, L. Hlinský, ing. L. Hloušek, A. Hofhans, Z. Hradský, ing. J. T. Hyan, J. Krémárik, ZMS, K. Novák, ing. O. Petráček, M. Procházka, ing. K. Pytner, ing. J. Vackář, CSc, laureát st. ceny KG, J. Zeníšek ● Ročně vyjde 6 čísel. Cena výtisku 4,50 Kčs, pololetní předplatné 13,50 Kčs, roční předplatné 27,— Kčs ● Rozšiřuje PNS, v jednotkách ozbrojených sil MAGNET – administrace, Praha 1, Vladislavova 26. Objednávky přijímá každá pošta i doručovatel ● Objednávky do zahraničí vyřizuje PNS – vývoz tisku, Jindřišská 14, Praha 1 ● Dohládací pošta 07 ● Tiskne Naše vojsko, závod 01, Na Valech 1, Praha – Dejvice ● Za původnost příspěvků ručí autor. Redakce rukopis vrátí, bude-li vyžádán a bude-li připojena frankovaná obálka se zpětnou adresou ● Toto číslo vyšlo 23. srpna 1970

© Vydavatelství Magnet Praha

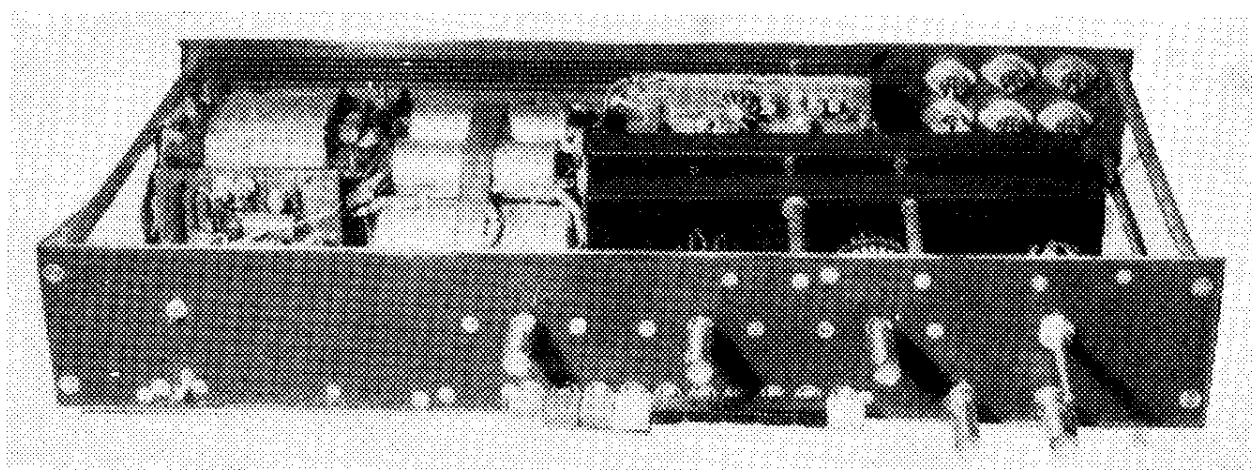


SOUČÁSTKY PRO AMATÉRY?

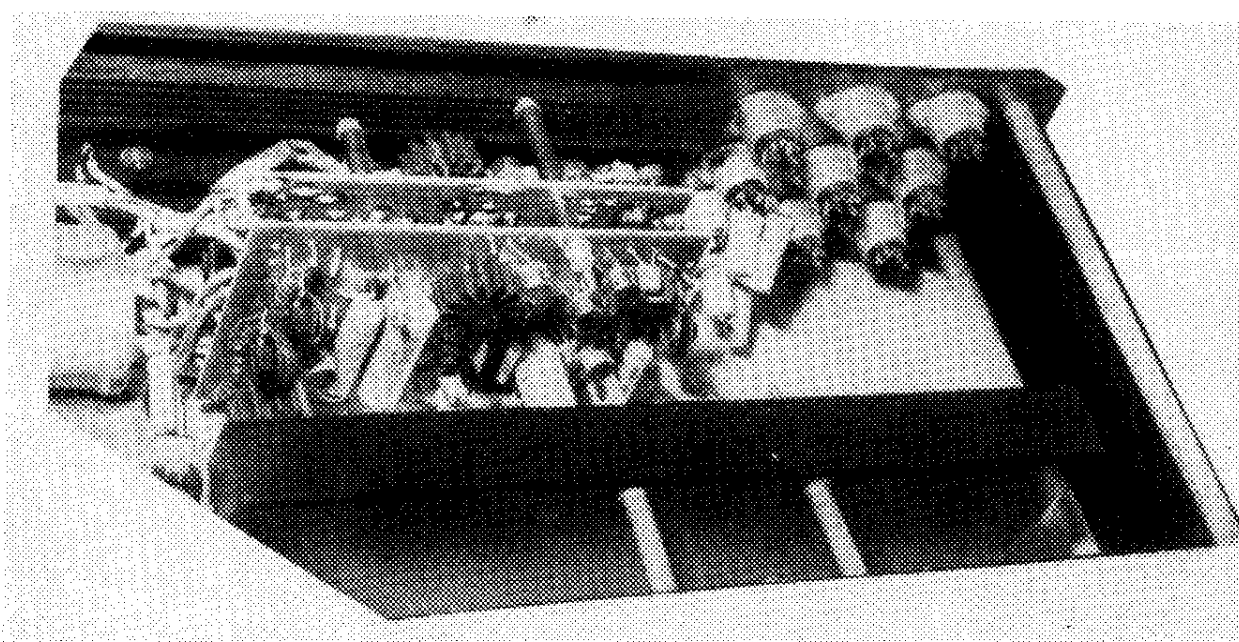
Žádejte v prodejnách Tesla, zejména v Praze 1, Martinská 3; v Brně, Františkánská 7 a v Bratislavě, Červenej armády 8 a 10



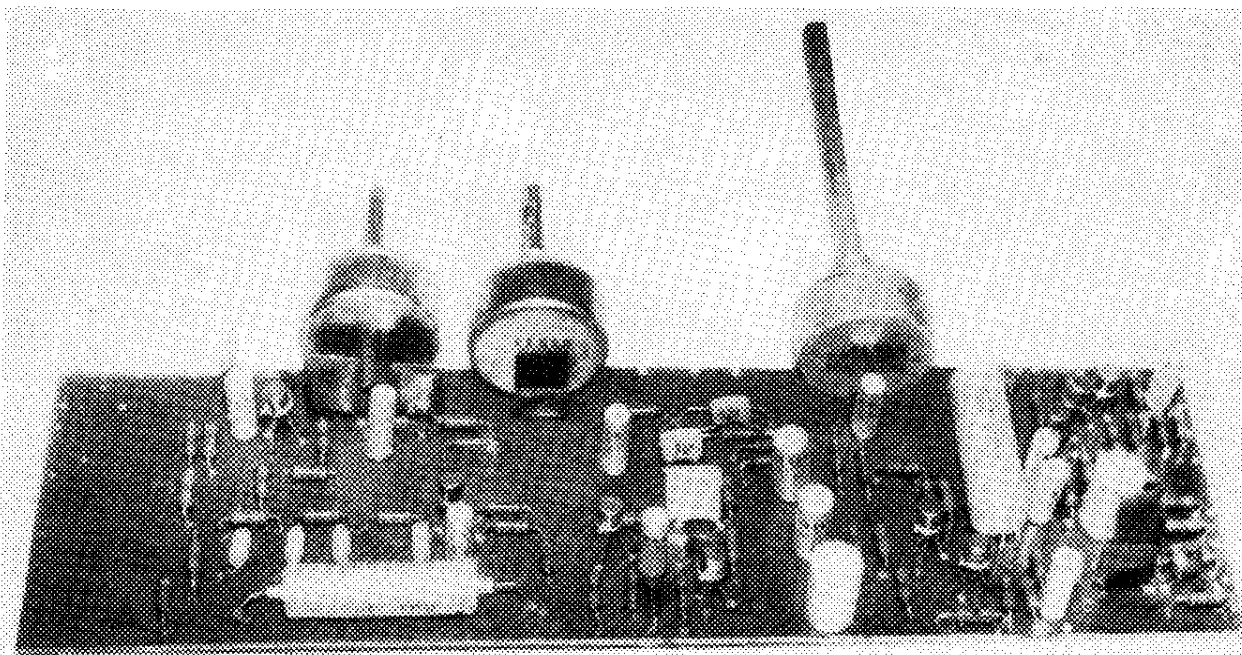
Zadní panel (chladič) s tranzistory a konektory



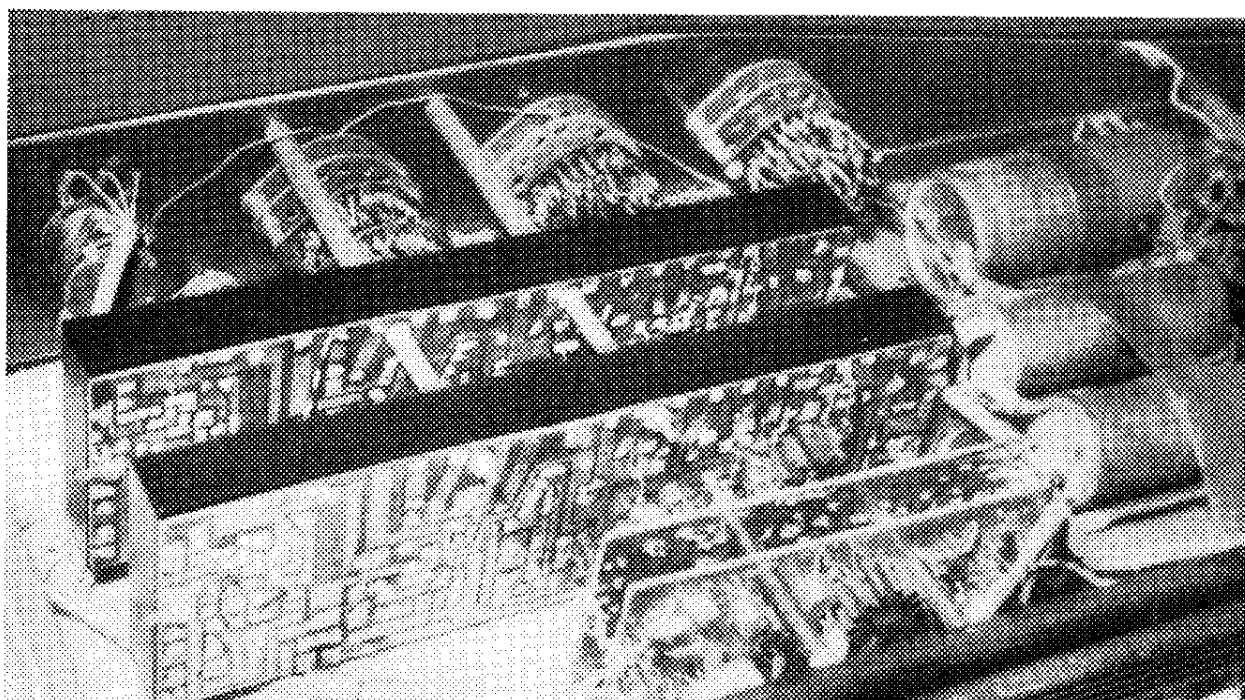
Způsob montáže základního čelního panelu



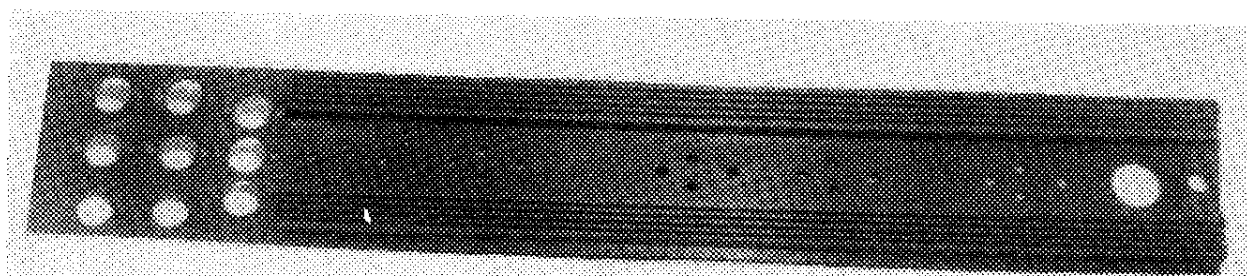
Detail upevnění desek koncových zesilovačů



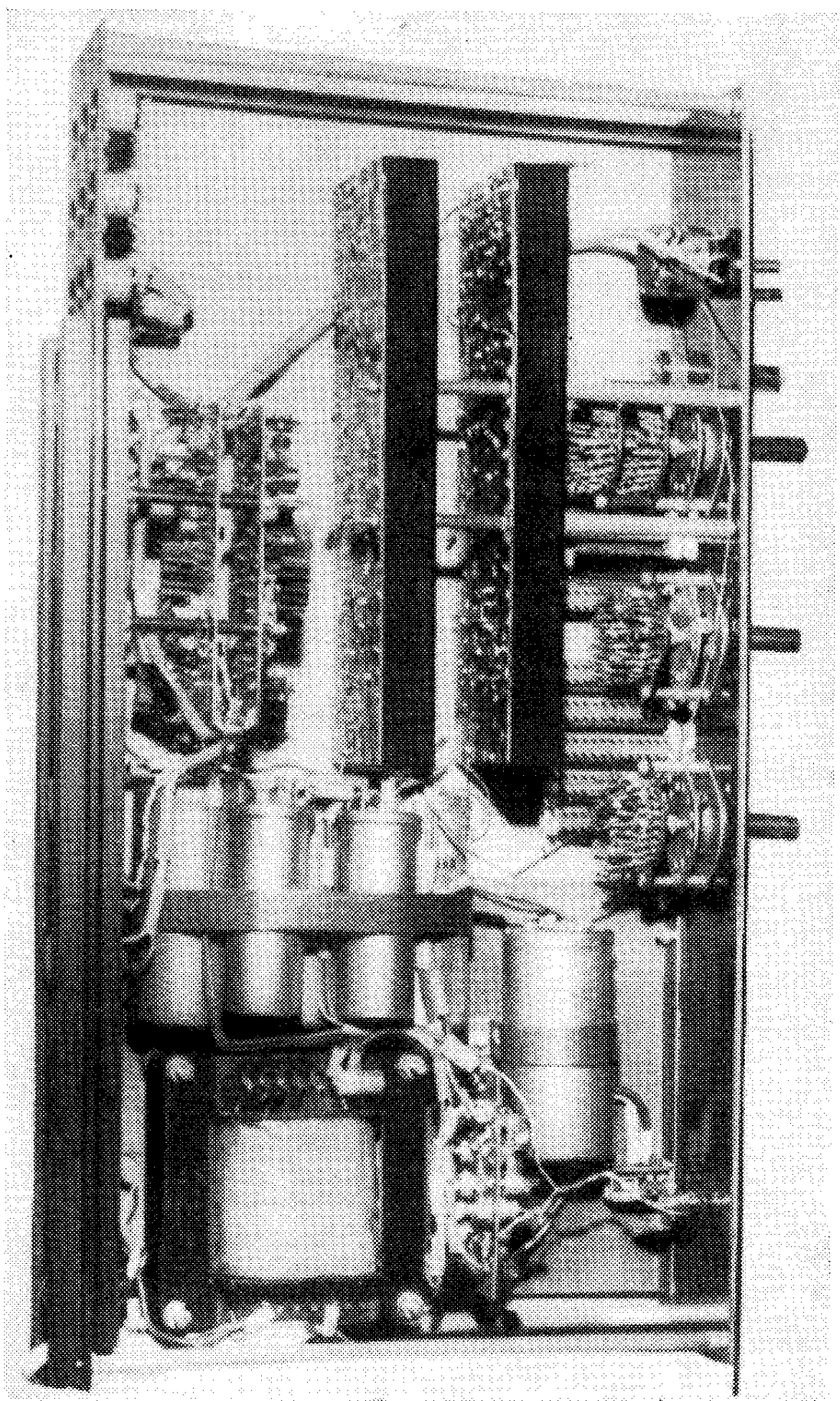
Destička předzesilovače, upravená k nastavování



Detail upevnění desek předzesilovače k panelu



Chladič tranzistorů s děrami pro konektory a pojistkové pouzdro



Zesilovač S 2 × 50 W při pohledu odzadu